

Daniel Rodrigo Moretti

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE FALTAS EM
ISOLAÇÃO DE ALTA TENSÃO APLICADA EM ESTADORES
DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós
Graduação da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Corientador: Eng. Fredemar Rincos, Dr.

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Moretti, Daniel Rodrigo

Investigação experimental sobre faltas em isolação de alta
tensão aplicada em estatores de máquinas elétricas / Daniel
Rodrigo Moretti ; orientador, Nelson Jhoe Batistela ; coorientador,
Fredemar Rüncos. – Florianópolis, SC, 2016.

171 p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Dielétricos aplicados ao estator de
máquinas elétricas. 3. Descargas parciais. 4. Perdas dielétricas. I.
Batistela, Nelson Jhoe. II. Rüncos, Fredemar. III. Universidade
Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. IV. Título.

Daniel Rodrigo Moretti

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE FALTAS EM
ISOLAÇÃO DE ALTA TENSÃO APLICADA EM ESTADORES
DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Elétrica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 01 de Abril de 2016.

Prof. Carlos Galup Montoro, Dr.
Coordenador do Curso

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Fredemar Rüncos, Dr.
Coorientador
Weg Equipamentos Elétricos S.A.

Banca Examinadora:

Eng. Sebastião Lauro Nau, Dr.
WEG Equipamentos Elétricos S.A.

Prof. Carlos Renato Rambo, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a minha esposa, aos meus pais e as minhas irmãs.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me dar força e saúde para superar as dificuldades.

À minha esposa Anelise pela paciência e compreensão durante todo o período de dedicação para finalização deste trabalho.

Aos meus pais Arcelino e Cideni e as minhas irmãs Francielli e Simone pelo apoio incondicional.

Aos meus orientadores Prof. Jhoe e Eng. Fredemar pelo tempo despendido neste trabalho e pelos direcionamentos durante o andamento de toda investigação.

À WEG Equipamentos Elétricos S.A. pela estrutura disponibilizada durante a confecção das amostras e durante os ensaios dielétricos.

Ao Prof. Mauricio do GRUCAD pelas orientações durante a revisão do trabalho.

A todos os professores e funcionários do GRUCAD que de alguma forma contribuíram para a minha formação.

“Eu tentei 99 vezes e falhei, mas na centésima tentativa eu consegui, nunca desista de seus objetivos mesmo que esses pareçam impossíveis, a próxima tentativa pode ser a vitoriosa.”

(Albert Einstein)

RESUMO

O domínio sobre as técnicas de transformação de energia elétrica é amplamente discutido e tornam-se cada vez mais importantes à medida que bilhões de pessoas ficam dependentes da disponibilidade do fornecimento de energia elétrica. Os materiais dielétricos ao longo de muitos anos têm tornado as máquinas elétricas mais eficientes devido ao aumento de rendimento e da confiabilidade, e eles podem ser considerados um dos diferenciais no desenvolvimento de novas tecnologias. O entendimento dos fenômenos físicos e químicos inerentes ao dielétrico, devido às exigências elétrica, térmica e mecânica, tem demonstrado ser muito útil para fabricantes, concessionárias de energia e usuários em todos os tipos de aplicação. A correta medição e a interpretação do comportamento do sistema de isolamento são exemplos das ferramentas para controle da degradação do dielétrico, e tem evitado que uma simples falta se torne um risco aos envolvidos na operação das máquinas elétricas girantes. Além disso, garante-se a disponibilidade dos equipamentos pelo maior tempo de serviço possível. Esse trabalho aborda técnicas de medição, mundialmente conhecidas, de resposta do dielétrico através da simulação de falhas comuns no processo de fabricação de um sistema de isolamento. Interpreta-se resultados de ensaios de resistência da isolamento, de índice de polarização, de perdas dielétricas, de capacitância, de descargas parciais e de rampa em tensão contínua. Através dos testes realizados, foi possível detectar danos propositalmente inseridos em sistemas de isolamento aplicados em estatores de máquinas elétricas girantes de alta tensão.

Palavras-chave: Dielétricos. Perdas dielétricas. Descargas parciais.

ABSTRACT

The understanding of energy transformation techniques are widely discussed and become important once billions of people are dependent on the availability of power supply. The dielectric materials over many years has increased the efficiency of electric machines, the reliability, and can be considered one of the most important field in the development of new technologies. The good understanding of the physics and chemistry phenomena inherent in the dielectric, due to the electrical, thermal and mechanical requirements has proven to be very useful for manufacturers, electric power utilities and users in all types of applications. The correct measurement and interpretation of the insulation system behavior is one of the main tools for the dielectric quality control and has prevented a single issue becomes a risk to those involved in the operation of the electrical rotating machines as well as has ensured the availability of equipment life time. The dielectric response through the simulation of manufacturing process issues for an insulation system is presented through of measurement of insulation resistance, polarization index, dielectric losses, capacitance, partial discharges and DC ramp test. With all dielectric tests performed it was possible to detect damage intentionally inserted into insulation system applied in high voltage stators of electrical rotating machines.

Keywords: Dielectrics. Dielectric Losses. Partial Discharges.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Amostra de um sistema de isolamento e eletrodos de medição	39
Figura 2 – Estator trifásico.....	41
Figura 3 – Bobina e barra roebel.....	42
Figura 4 – Isolação duas camadas.....	43
Figura 5 – Mica muscovita	45
Figura 6 – Mica flogopita	46
Figura 7 – Estrutura molecular da mica	46
Figura 8 – Grupo epóxi na extremidade da cadeia.....	48
Figura 9 – Representação da capacitância da isolamento e do vazio entre bobina/barra e núcleo.....	49
Figura 10 – Circuito equivalente da isolamento.....	50
Figura 11 – Sistema de isolamento sem atenuação do campo elétrico	51
Figura 12 - Sistema de isolamento com atenuação do campo elétrico	52
Figura 13 – Circuito básico do dielétrico do estator bobinado.....	53
Figura 14 – Capacitor de placas paralelas.....	55
Figura 15 – Capacitor no vácuo e com dielétrico	56
Figura 16 – Polarização eletrônica.....	56
Figura 17 – Polarização atômica.....	57
Figura 18 – Dipolos no interior de um dielétrico	58
Figura 19 – Distribuição de cargas	59
Figura 20 – O dipolo elétrico.....	60
Figura 21 – O dipolo elétrico na origem do sistema de coordenadas.....	62
Figura 22 – O dipolo elétrico.....	63
Figura 23 – Polarização do dielétrico	70
Figura 24 – Polarização Interfacial: a) sem campo elétrico aplicado e b) com campo elétrico aplicado	71
Figura 25 – Variação da permissividade elétrica relativa e índice de perdas em função da frequência de um campo elétrico alternado.	73
Figura 26 – Perdas no dielétrico	74
Figura 27 – Origem das descargas parciais no sistema de isolamento	78
Figura 28 – Circuito equivalente da descarga parcial	79
Figura 29 – Circuito de medição da descarga parcial	80
Figura 30 – Classificação aproximada das descargas parciais	81
Figura 31 – Ocorrência das descargas parciais	83
Figura 32 – Posição das descargas parciais e sua polaridade.....	84
Figura 33 – Padrão do efeito das descargas parciais para delaminação	85
Figura 34 – Padrão do efeito das descargas parciais na superfície da cabeça de bobina	85
Figura 35 – Padrão do efeito das descargas parciais internas e externas	86
Figura 36 – Circuito equivalente.....	87
Figura 37 – Circuito equivalente simplificado.....	88
Figura 38 – Decomposição da corrente dielétrica de uma isolamento epóxi-mica.....	89
Figura 39 – Coeficiente de temperatura da isolamento - K_T	91

Figura 40 – Tangente de delta – IEEE 286.....	93
Figura 41 – Esquema de ensaio com eletrodos limitadores para medição	94
Figura 42 – Arranjo de para medição de descargas parciais de uma amostra	96
Figura 43 – Exemplo da rampa de tensão CC recomendada pela IEEE 95.	97
Figura 44 – Curva de resposta da isolação a uma tensão aplicada CC	97
Figura 45 – Resposta típica ao ensaio de rampa de tensão para um isolamento epóxi-mica	98
Figura 46 – Vista principal do processo de enfitamento das amostras	102
Figura 47 – Seção transversal do sistema de isolação	103
Figura 48 – Amostras prontas para serem submetidas ao VPI.....	104
Figura 49 – Resultado do ensaio de resistência da isolação para as amostras com processo normal de fabricação – amostras 1 a 4.....	105
Figura 50 – Resultado do ensaio de resistência da isolação para as amostras com cura incompleta – amostras 5 a 8.....	105
Figura 51 – Resultado do ensaio de resistência da isolação para as amostras com dano na fita de proteção contra descargas parciais para simulação de vazios na superfície– amostras 9 a 12	106
Figura 52 – Resultado do ensaio de resistência da isolação para as amostras com contaminante interno– amostras 13 a 16.....	106
Figura 53 – Resultado do ensaio de resistência da isolação para as amostras com baixa tração durante enfitamento para simulação de vazios internos – amostras 17 a 20	107
Figura 54 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas para as amostras com processo normal de fabricação – amostras 1 a 4.....	107
Figura 55 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas para as amostras com cura incompleta – amostras 5 a 8	108
Figura 56 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas para as amostras com dano na fita de proteção contra descargas parciais para simulação de vazios na superfície– amostras 9 a 12	108
Figura 57 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas para as amostras com contaminante interno– amostras 13 a 16.....	109
Figura 58 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas para as amostras com baixa tração durante enfitamento para simulação de vazios internos – amostras 17 a 20	109
Figura 59 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio – amostras 1 a 4.....	110
Figura 60 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio – amostras 5 a 8.....	110
Figura 61 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio – amostras 9 a 12.....	111
Figura 62 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio – amostras 13 a 16.....	111
Figura 63 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio – amostras 17 a 20.....	112

Figura 64 – Resultado do ensaio de capacitância para as amostras com processo normal de fabricação – amostras 1 a 4.....	112
Figura 65 – Resultado do ensaio de capacitância para as amostras com cura incompleta – amostras 5 a 8.....	113
Figura 66 – Resultado do ensaio de capacitância para as amostras com dano na fita de proteção contra descargas parciais para simulação de vazios na superfície– amostras 9 a 12.....	113
Figura 67 – Resultado do ensaio de capacitância para as amostras com contaminante interno– amostras 13 a 16.....	114
Figura 68 – Resultado do ensaio de capacitância para as amostras com baixa tração durante enfitamento para simulação de vazios internos – amostras 17 a 20	114
Figura 69 – Resultado do ensaio de rampa em tensão contínua para as amostras com processo normal de fabricação – amostras 1 a 4	115
Figura 70 – Resultado do ensaio de rampa em tensão contínua para as amostras com cura incompleta – amostras 5 a 8	115
Figura 71 – Resultado do ensaio de rampa em tensão contínua para as amostras com dano na fita de proteção contra descargas parciais para simulação de vazios na superfície– amostras 9 a 12.....	116
Figura 72 – Resultado do ensaio de rampa em tensão contínua para as amostras com contaminante interno– amostras 13 a 16.....	116
Figura 73 – Resultado do ensaio de rampa em tensão contínua para as amostras com baixa tração durante enfitamento para simulação de vazios internos – amostras 17 a 20	117
Figura 74 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 1.....	117
Figura 75 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 2.....	118
Figura 76 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 3.....	118
Figura 77 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV – amostra 4.....	118
Figura 78 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV – amostra 5.....	119
Figura 79 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 6.....	119
Figura 80 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 7.....	119
Figura 81 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 8.....	120
Figura 82 – Medição descargas parciais -13,8kV – amostra 9.....	120
Figura 83 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 10.....	120
Figura 84 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 11.....	121
Figura 85 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV –amostra 12....	121
Figura 86 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 13.....	121
Figura 87 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV – amostra 14..	122
Figura 88 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 15.....	122
Figura 89 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 16.....	122
Figura 90 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 17.....	123
Figura 91 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 18.....	123
Figura 92 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 19.....	123
Figura 93 – Medição descargas parciais -13,8kV – amostra 20.....	124
Figura 94 – Medição do índice de polarização	127

Figura 95 – Medição da resistência da isolamento – 1 minuto	128
Figura 96 - Medição do Tip Up	128
Figura 97 – Medição da capacitância	129
Figura 98 – Medição das descargas parciais.....	129
Figura 99 - Classificação das amostras.....	130
Figura 100 – Resultado do ensaio de resistência da isolamento.....	131
Figura 101 – Ensaio para determinação do índice de polarização	132
Figura 102 – Comparação entre amostra 4 e 5 para o ensaio de resistência da isolação com 10 minutos de ensaio	132
Figura 103 – Comparação entre amostra 4 e 12 para o ensaio de resistência da isolação com 10 minutos de ensaio	133
Figura 104 – Comparação entre amostra 4 e 14 para o ensaio de resistência da isolação com 10 minutos de ensaio	133
Figura 105 – Comparação entre amostra 4 e 18 para o ensaio de resistência da isolação com 10 minutos de ensaio	134
Figura 106 – Índice de polarização entre amostras.....	134
Figura 107 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas	135
Figura 108 – Comparação entre amostra 4 e 5 para o ensaio de perdas dielétricas	137
Figura 109 – Comparação entre amostra 4 e 12 para o ensaio de perdas dielétricas.....	137
Figura 110 – Comparação entre amostra 4 e 14 para o ensaio de perdas dielétricas.....	138
Figura 111 - Comparação entre amostra 4 e 18 para o ensaio de perdas dielétricas.....	138
Figura 112 – Resultado do ensaio de capacitância	139
Figura 113 – Comparação entre amostra 4 e 5 para o ensaio de capacitância .	140
Figura 114 – Comparação entre amostra 4 e 12 para o ensaio de capacitância	140
Figura 115 – Comparação entre amostra 4 e 14 para o ensaio de capacitância	141
Figura 116 - Comparação entre amostra 4 e 18 para o ensaio de capacitância	141
Figura 117 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas com variação da frequência	142
Figura 118 – Comparação entre amostra 4 e 5 para o ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio.....	142
Figura 119 – Comparação entre amostra 4 e 12 para o ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio	143
Figura 120 – Comparação entre amostra 4 e 14 para o ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio	143
Figura 121 – Comparação entre amostra 4 e 18 para o ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio	144
Figura 122 – Medição da permissividade do dielétrico das amostras	144
Figura 123 – Medição do fator de perdas do dielétrico das amostras	145
Figura 124 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV – amostra 4..	147
Figura 125 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV – amostra 5..	147
Figura 126 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV – amostra 12	148

Figura 127 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV – amostra 14148	
Figura 128 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV – Amostra 18	
.....	149
Figura 129 – Resposta à rampa de tensão em tensão contínua	150
Figura 130 – Comparação entre amostras 4 e 5 para o ensaio de rampa em	
tensão contínua	151
Figura 131 – Comparação entre amostras 4 e 12 para o ensaio de rampa em	
tensão contínua	151
Figura 132 – Comparação entre amostras 4 e 14 para o ensaio de rampa em	
tensão contínua	152
Figura 133 – Comparação entre amostras 4 e 18 para o ensaio de rampa em	
tensão contínua	152

LISTA DE FIGURAS – APÊNDICE A

Figura A1 – Dimensões das amostras de isolamento	169
Figura A2 – Seção transversal da amostra de isolamento	170
Figura A3 – Dano na proteção contra descargas parciais	171

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Rigidez dielétrica dos materiais	47
Tabela 2 – Índice de polarização mínimo – IEEE43.....	90
Tabela 3 – Classe de temperatura do sistema de isolamento.....	90
Tabela 4 – Valor mínimo da resistência da isolação pela IEEE43.....	92
Tabela 5 – Valor mínimo do índice de polarização pela IEEE43	93
Tabela 6 – Amostras para sistema de isolação – 13,8kV _{CA}	101
Tabela 7 – Resultados dos ensaios nas amostras	124
Tabela 8 – Classificação das amostras	125
Tabela 9 – Resultados do ensaio de medição da resistência da isolação a 1 minuto.....	131
Tabela 10 – Resultados do ensaio de medição do índice de polarização	135
Tabela 11 – Resultados do ensaio de perdas dielétricas.....	136
Tabela 12 – Resultados do ensaio de perdas dielétricas.....	136
Tabela 13 – Resultados do ensaio de capacitância.....	139
Tabela 14 – Resultado do ensaio de descargas parciais	146
Tabela 15 – Resultados do ensaio de rampa em tensão contínua.....	149
Tabela 16 – Resultados dos ensaios nas amostras	153
Tabela 17 – Efetividade na detecção da falta de isolação	158

LISTA DE TABELAS – APÊNDICE A

Tabela A1 – Dados da fita de mica	167
Tabela A2 – Dados da fita a base de carbono	167
Tabela A3 – Dados da fita a base de carbetto de silício	168
Tabela A4 – Dados da fita de proteção contra corona	168
Tabela A5 – Dados da resina epóxi	169
Tabela A6 – Materiais utilizados nas amostras.....	170

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\Delta \tan \delta$	Variação das perdas dielétricas por degrau de tensão de ensaio
CA	Tensão senoidal utilizada em ensaios “ <i>Off-Line</i> ”
CC	Tensão contínua utilizado em ensaio “ <i>Off-Line</i> ”
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão
<i>FP</i>	Fator de potencia do dielétrico
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
$\tan \delta$	Ângulo de perdas do dielétrico
Tip-Up	Critério para avaliação das perdas dielétricas
μA	Micro Ampére
U_n	Tensão nominal para referência em ensaios nos dielétricos
<i>Off-line</i>	Método de medição utilizando fonte externa
<i>On-line</i>	Método de medição utilizado com a máquina em operação
DP	Descargas parciais

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ_{0P}	Densidade volumétrica de cargas de polarização
\vec{p}_e^+	Momento do dipolo elétrico das cargas positivas
E_{CAV}	Campo elétrico dentro da cavidade interna do dielétrico
σ	Condutividade
id	Corrente de deslocamento
ρ_p	Densidade de carga de polarização
\vec{J}_d	Densidade de corrente de deslocamento do dielétrico
\vec{J}	Densidade de corrente elétrica
ρ_s	Densidade de superficial de cargas
ρ_{sp}	Densidade de superficial de cargas de polarização
\vec{f}_e	Força de Lorentz
\vec{F}_e	Força de Lorentz na forma integral
$d\vec{p}_e$	Momento do dipolo elementar
\vec{p}_e^-	Momento do dipolo elétrico das cargas negativas
\vec{p}_e	Momento do dipolo elétrico
∇	Operador nabla
Φ_e	Potencial em um dipolo puntiforme
Φ_p	Potencial escalar de polarização
V_B	Tensão de ruptura de um gás na CNT
\vec{H}	Vetor campo magnético
\vec{n}	Vetor normal à superfície de dois meios dielétricos diferentes
\vec{r}_+	Vetor posição da densidade volumétrica de cargas positivas
\vec{r}_-	Vetor posição da densidade volumétrica de cargas negativas
\vec{a}_r	Vetor unitário
\vec{E}_0	Vetor campo elétrico do capacitor no vácuo
\vec{E}_d	Vetor campo elétrico no dielétrico
\vec{r}_q	Vetor posição da carga elétrica no dipolo elétrico
\vec{D}	Vetor indução elétrica

\vec{E}	Vetor campo elétrico
\vec{P}	Vetor polarização do dielétrico
C	Capacitância dielétrica para o modelo básico
C_d	Capacitância do dielétrico – Modelo com perdas
C_o	Capacitância geométrica
C_p	Capacitor do dielétrico – Representação paralela pura
d	Distância entre as placas do capacitor
f	Frequência
I	Corrente no dielétrico
I_0	Corrente da capacitância geométrica
I_l	Corrente de fuga
I_P	Corrente de polarização
IP	Índice de polarização
I_{pd}	Corrente devido à atividade de descargas parciais
I_t	Corrente total do dielétrico. Soma das correntes devido à capacitância geométrica de carga, polarização dielétrica, fuga pela superfície e volume e descargas parciais.
j	$\sqrt{-1}$
K_T	Coefficiente de temperatura da resistência da isolação
l	Distância entre cargas elétricas do dipolo elétrico
$M\Omega$	Megaohms.
nF	Nano Faraday
P_d	Perdas no dielétrico
pd	Produto da pressão interna do vazio e a distância da cavidade
q	Carga elétrica no dipolo elétrico
Q	Carga elétrica
Q_o	Cargas existentes se as placas do capacitor estiverem separadas pelo vácuo
R	Resistência da isolação
$R1$	Resistência da isolação medida a 1 minuto
$R10$	Resistência da isolação medida a 10 minutos
R_a	Resistência de perdas devido à polarização atômica
R_C	Resistência da isolação corrigida para 40°C
R_d	Resistência de perdas devido à polarização de dipolos
R_e	Resistência de perdas devido à polarização eletrônica
R_i	Resistência de perdas devido à polarização por cargas espacial.
R_L	Resistência de perdas por corrente de condução
R_P	Resistor de perdas dielétricas – Representação paralela pura
R_{pd}	Resistência de perdas por descargas parciais
R_s	Resistor de perdas dielétricas – Representação série pura

R_T	Resistência da isolação medida à temperatura ambiente
t	Tempo em segundos.
$\tan\delta$	Tangente do ângulo de perdas dielétricas
V	Potencial/Tensão elétrica
V	Volume
V_o	Diferença de potencial do capacitor no vácuo
W	Trabalho para mover uma carga Q
X_d	Reatância capacitiva do dielétrico
δ	Ângulo de perdas do dielétrico
ϵ	Permissividade do meio
ϵ^*	Permissividade complexa
ϵ'	Permissividade relativa
ϵ''	Fator de perdas
ϵ_r	Permissividade relativa do material
θ	Ângulo do fator de potência do dielétrico
ρ_v	Densidade volumétrica de cargas livres
τ	Tempo de relaxação

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE FIGURAS – APÊNDICE A	21
LISTA DE TABELAS	23
LISTA DE TABELAS – APÊNDICE A	25
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	27
LISTA DE SÍMBOLOS	29
SUMÁRIO	33
1 – INTRODUÇÃO	37
1.1 – Motivação e colocação da questão do trabalho	37
1.2 – Objetivos do trabalho	38
1.3 – Alguns aspectos metodológicos do trabalho	39
1.4 – Organização da apresentação do trabalho	40
2 – MATERIAIS DIELÉTRICOS UTILIZADOS EM MOTORES E GERADORES DE ALTA TENSÃO	41
2.1 – Sistema de isolamento de máquinas de alta tensão	41
2.2 – Materiais isolantes	44
2.2.1 – Mica	45
2.2.2 – Epóxi	48
2.2.3 – Material a base de carbono	49
2.2.4 – Material a base de carbetto de silício	50
2.3 – Considerações finais do capítulo	52
3 – PRINCIPAIS FENÔMENOS, O CIRCUITO EQUIVALENTE DO DIELÉTRICO DE UM ESTATOR DE UMA MÁQUINA DE ALTA TENSÃO E OS MÉTODOS DE ENSAIOS UTILIZADOS NA INVESTIGAÇÃO.	53
3.1 – O comportamento da isolação através do ensaio “Off-Line”	53
3.1.1 – Capacitância geométrica	54
3.1.2 – Polarização dielétrica	55
3.1.2.1 – Polarização eletrônica	56
3.1.2.2 – Polarização atômica	57
3.1.2.3 – Polarização dos dipolos	57
3.1.2.4 – Polarização por cargas espaciais	71
3.1.3 – O tempo de relaxação da polarização dielétrica	71

3.1.4 – Permissividade complexa e a tangente de perdas	72
3.1.5 – Condução	77
3.1.6 – Descargas parciais	78
3.2 – O circuito equivalente do sistema de isolamento	86
3.3 – Métodos de ensaio utilizados na investigação - Modo “Off-Line”	88
3.3.1 – Ensaio de resistência da isolamento	88
3.3.2 – Ensaio de índice de polarização	92
3.3.3 – Ensaio de perdas dielétricas e capacitância	93
3.3.4 – Ensaio de perdas dielétricas com frequência de ensaio variável	95
3.3.5 – Ensaio de descargas parciais	95
3.3.6 – Ensaio de rampa em tensão contínua	96
3.4 – Considerações finais do capítulo	99
4 – ENSAIOS REALIZADOS NAS AMOSTRAS DE UM SISTEMA DE ISOLAÇÃO 13,8KV	101
4.1 – Fabricação de amostras de um sistema de isolamento para alta tensão	101
4.2 – Ensaio de avaliação realizados pelo método “Off Line”	104
4.2.1 – Resultado do ensaio de resistência da isolamento	105
4.2.2 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas	107
4.2.3 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas com variação da frequência da tensão de ensaio	110
4.2.4 – Resultado do ensaio de capacitância	112
4.2.5 – Resultado do ensaio de tensão sob rampa em tensão contínua	114
4.2.6 – Resultado do ensaio de descargas parciais	117
4.3 – Classificação das amostras	124
4.3.1 – Resultados dos ensaios das amostras fabricadas	124
4.4 – Avaliação sobre as amostras classificadas	130
4.4.1 – Resistência da isolamento	130
4.4.2 – Índice de polarização	132
4.4.3 – Perdas dielétricas	135
4.4.4 – Capacitância	139
4.4.5 – Perdas dielétricas com frequência de ensaio variável	141
4.4.6 – Descargas parciais	146

4.4.7 – Rampa em tensão contínua	149
4.5 – Considerações finais do capítulo	153
5 - CONCLUSÃO	157
a) Ensaio em rampa de tensão contínua	159
b) Ensaio de resistência da isolação e índice de polarização	159
c) Ensaio de perdas dielétricas – Tangente delta	160
d) Ensaio de capacitância	161
e) Ensaio de perdas dielétricas com variação da frequência da tensão	161
f) Ensaio de descargas parciais	162
g) Considerações finais	162
REFERÊNCIAS	163
APÊNDICE A – DADOS TÉCNICOS DOS MATERIAIS UTILIZADOS E DIMENSÕES DAS AMOSTRAS	167
A1– Materiais dielétricos	167
A1.1 – Materiais utilizados no dielétrico	167
A1.1.1 – Mica - Isolação principal	167
A1.1.2 – Fita a base de carbono	167
A1.1.3 – Fita a base de carbetto de silício	168
A1.1.4 – Fita de proteção contra corona	168
A1.1.5 – Resina epóxi	169
A2 – Dimensões e características das amostras	169
A2.1 – Dimensões das amostras e materiais utilizados	169
A2.1.1 – Amostra padrão	170
A2.1.2 – Amostra com cura incompleta	170
A2.1.3 – Amostra com dano na fita de proteção contra descargas parciais para simulação de vazios na superfície	171
A2.1.4 – Contaminante interno	171
A2.1.5 – Baixa tração durante enfitamento para simulação de vazios internos	171

1 – INTRODUÇÃO

Durante a vida útil de grandes motores e geradores elétricos, particularmente com tensão nominal acima de 6.000 V, os estatores bobinados estão constantemente submetidos a estresse mecânico, elétrico e térmico, impactante na vida útil da isolação dos condutores e de bobinas seja reduzida.

RUX (2004) diz que o monitoramento de máquinas elétricas girantes de alta tensão tem aumentado a sua disponibilidade e reduzido os custos de manutenção. Durante o diagnóstico de motores e geradores, alguns tipos de ensaios não destrutivos são necessários para avaliação da qualidade e da condição do sistema de isolação dos estatores bobinados, de modo que identifiquem envelhecimento precoce e falhas eminentes, assegurando uma condição mínima de resistência da isolação.

1.1 – Motivação e colocação da questão do trabalho

Sob o aspecto elétrico de uma máquina, a vida útil é definida como sendo um período de tempo durante o qual o sistema de isolação pode ser usado confiavelmente. Estatores com boa qualidade têm geralmente a expectativa de suportar mais de 25 anos de operação, conforme estabelecido por STONE (1988). Vários fatores podem afetar a isolação, dentre eles a absorção de umidade, fugas de corrente, dano por descargas elétricas, contaminação por produtos químicos e estresse elétrico, térmico ou mecânico. Uma falha de isolação inesperada pode causar elevado custo de reparo e principalmente perda de produtividade.

Métodos convencionais de avaliação são utilizados durante o diagnóstico, monitoramento e garantia das mínimas condições da isolação. As técnicas incluem o ensaio de tensão aplicada CA, medição de descargas parciais *on-line* e/ou *off-line*, medições das perdas no dielétrico, ensaio de tensão aplicada CC, resistência da isolação, índice de polarização, entre outros. Ensaios periódicos de avaliação da isolação usando tensão contínua é uma prática mundialmente aceita pelos fabricantes de máquinas elétricas. O primeiro relato para diagnóstico da isolação sobre o método da medição da corrente da isolação versus tensão contínua foi realizada por EVERSLED (1913). Os estudos realizados na época demonstraram as características da isolação quando submetida à tensão contínua. Conforme RUX (2004), no início dos anos de 1950, o método de plotagem da corrente de fuga versus degrau de tensão contínua foi demonstrado por HILL (1953), e publicado no artigo *“Testing Electrical Insulation of Rotating Machinery with High Voltage*

Direct Current” no American Institute of Electrical Engineers (AIEE). Os benefícios do teste da tensão contínua foram rapidamente reconhecidos e este teste, portanto, começou a ser utilizado como técnica de avaliação. Houve um refinamento desenvolvido por SCHLEIF (1956) para reduzir significativamente o tempo de ensaio e aumentar a precisão dos resultados. Em 1957, o comitê de máquinas rotativas da AIEE começou a preparar um guia para execução e interpretação dos resultados dos ensaios em tensão contínua. Assim, surgiu a norma AIEE 95 “Guide for Insulation Testing of Large A-C Rotating Machinery with Direct Voltage”, publicada em 1962 e revisada em 1977 pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

Através de equipamentos sofisticados, o ensaio em tensão contínua foi simplificado, o tempo de ensaio reduzido, proporcionando um aumento na precisão e na repetibilidade dos resultados dos testes. Passados 35 anos, esta técnica tem sido usada no monitoramento e avaliação de grandes hidrogeradores e motores. Em 2002, a norma IEEE Std 95, “Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300V and Above) with High Direct Voltage” foi revisada e atualizada, incluindo o ensaio de rampa em tensão contínua. Nota-se que este é um assunto ainda atual.

Sob o aspecto das máquinas elétricas associadas à sua aplicação, a falha do sistema de isolamento pode causar riscos humanos, de operação, comerciais e econômicos. Muitas vezes, a possibilidade de falha de uma máquina dever ser reduzida ao máximo devido às consequências que a sua inoperabilidade pode acarretar. Além disso, os fabricantes destas máquinas necessitam assegurar a qualidade de seus produtos, tendo em vista a diminuição da possibilidade de falhas e a garantia de maior vida útil.

Neste contexto, este trabalho se baseia na realização e análise de ensaios de isolamento. O princípio básico dos ensaios de isolamento será apresentado, bem como o comportamento físico da resposta de tensão e de corrente. Um modelo de isolamento de um estator bobinado de alta tensão será apresentado através de uma fundamentação teórica com base no entendimento e na análise macroscópica dos fenômenos de isolamento.

1.2 – Objetivos do trabalho

O presente trabalho, de cunho mais experimental do que teórico, tem por objetivo geral a realização de ensaios para avaliar e, se possível, demonstrar a efetividade de cada método/tipo de ensaio na avaliação e/ou determinação de características de um sistema de isolamento. As

características do sistema de isolamento se referem ao grau, possuidor ou não de falta incipiente detectável, isto é, se pode ser considerado normal ou possuidor de dano. Também, almeja-se gerar subsídios para ajudar na identificação da causa principal de falhas de isolamento em máquinas elétricas.

Os objetivos metodológicos são os seguintes:

- a) realizar estudo sobre as características dos dielétricos utilizados em máquinas elétricas operadas em tensões até 13.800 V;
- b) apresentar os principais fundamentos físicos e químicos de dielétricos aplicados em máquinas elétricas através de pesquisa sobre trabalhos publicados na área de engenharia elétrica;
- c) apresentar um circuito equivalente de um dielétrico aplicado em máquinas elétricas girantes através de modelo proposto em referências internacionais;
- c) confeccionar amostras de um sistema de isolamento utilizado em estatores de máquinas elétricas de 13.800 V e simular faltas, comparando-as com um sistema de isolamento considerado ideal (isto é, de boa qualidade);
- d) realizar ensaios não destrutivos, buscando demonstrar a relação entre as características de cada ensaio com respostas provenientes de cada tipo de amostra.

1.3 – Alguns aspectos metodológicos do trabalho

Como já mencionado, o trabalho tem um caráter experimental, onde ensaios são conduzidos objetivando a análise do comportamento da isolamento em função da inclusão de fatores de falhas. Os experimentos realizados foram conduzidos em amostras de barras padrão e instaladas em eletrodos de cobre que simulam a ranhura do núcleo do estator, como mostra Figura 1.

Figura 1 – Amostra de um sistema de isolamento e eletrodos de medição



Fonte: desenvolvido pelo autor

As amostras foram submetidas a alterações de processo para simulação das falhas. Os defeitos escolhidos foram principalmente aqueles que representam os típicos problemas de isolamento encontrados durante a vida útil da máquina elétrica como, por exemplo, cura incompleta, cavidades internas e superficiais, e contaminação.

Vários tipos de ensaios foram realizados, de maneira comparativa, a fim de detectar os diferentes tipos de problemas no sistema de isolamento. Os ensaios realizados foram: resistência da isolamento, índice de polarização, rampa de tensão em corrente contínua, fator de perdas dielétricas, capacitância e descargas parciais.

A aplicação dos tipos dos ensaios tem por objetivo principal averiguar, e se possível, demonstrar a efetividade de cada um através da comparação com um sistema considerado normal e outro que possua dano ou falta incipiente. Ainda neste contexto, busca-se gerar subsídios para ajudar na identificação da causa ou do tipo de falha de isolamento.

1.4 – Organização da apresentação do trabalho

O presente trabalho é composto por esta introdução, e pelo capítulo dois, onde são abordados os materiais dielétricos utilizados nas diferentes posições do estator bobinado em sistema de isolamento de alta tensão. O capítulo três trata das características físicas e químicas dos materiais dielétricos, os principais mecanismos de perdas e o circuito equivalente de um sistema de isolamento. O capítulo quatro apresenta os métodos de ensaios não destrutivos aplicados sobre as amostras fabricadas e os resultados encontrados. No capítulo cinco, as conclusões e as sugestões de trabalhos futuros sobre métodos de diagnóstico são abordados. O apêndice A apresenta os resultados dos ensaios em todas as amostras fabricadas para esta investigação. No apêndice B são mostradas as características dos materiais dielétricos utilizados no estudo e dimensões das amostras.

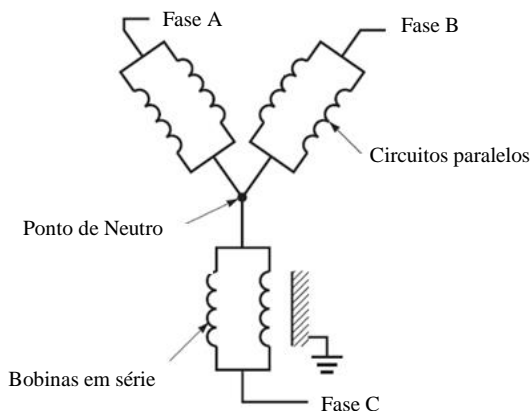
2 – MATERIAIS DIELÉTRICOS UTILIZADOS EM MOTORES E GERADORES DE ALTA TENSÃO

Este capítulo apresenta aspectos fundamentais de um sistema de isolamento de uma máquina elétrica de alta tensão, bem como os materiais dielétricos empregados. Inicia-se mostrando o sistema de isolamento de uma máquina de alta tensão trifásica, dois dos métodos de impregnação utilizados e, posteriormente, os principais materiais dielétricos utilizados na fabricação de motores e geradores.

2.1 – Sistema de isolamento de máquinas de alta tensão

Os enrolamentos do estator bobinado da maioria das máquinas de alta tensão são tipicamente constituídos por três fases individuais e são conectados em estrela através dos terminais de neutro. Cada fase pode ser constituída num circuito simples de uma série de bobinas conectadas ou dois ou mais circuitos paralelos, como ilustrado na Figura 2.

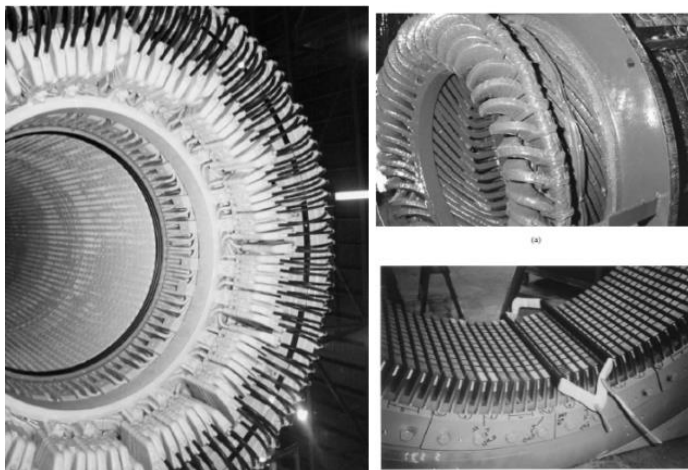
Figura 2 – Estator trifásico



Fonte: Stone G. C., Boulter E. A., Culbert E. A. B. I, Dhirani H. Electrical Insulation for Rotation Machines. Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair (2004).

Os enrolamentos do estator podem ser fabricados tanto com multi-bobinas ou barras roebel, conforme mostra Figura 3.

Figura 3 – Bobina e barra roebel

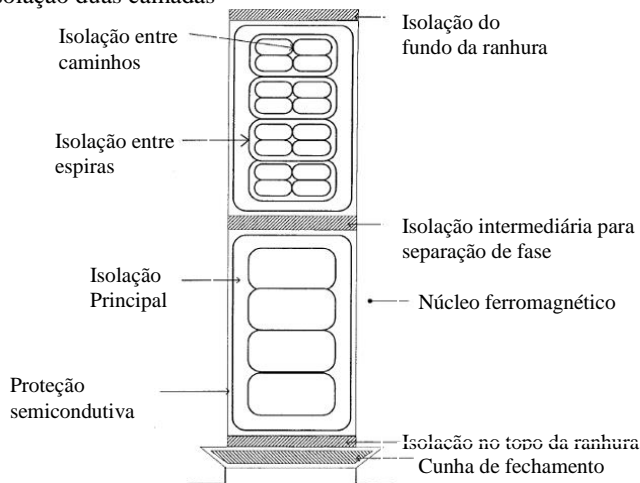


Fonte: Stone G. C., Boulter E. A., Culbert E. A. B. I, Dhirani H. Electrical Insulation for Rotation Machines. Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair (2004).

As bobinas do estator são tipicamente instaladas no núcleo através de duas camadas, e os materiais de suporte são incluídos na base, no meio e no topo da ranhura do núcleo para travamento das bobinas, como mostra a Figura 4. Como descrito por STONE (2004), o objetivo dos materiais de suporte na ranhura é assegurar que bobinas sejam firmemente fixadas ao núcleo para evitar a movimentação ou vibração durante a operação da máquina.

Os materiais dielétricos aplicados apresentam características específicas, pois cada um deve cumprir uma função diferente. A mica utilizada entre o núcleo e a bobina deve possuir resistência alta o suficiente para evitar o curto-circuito entre o condutor energizado e o núcleo aterrado. Por outro lado, os materiais com características condutivas utilizados na região da ranhura devem possuir resistência suficientemente baixa para permitir um bom contato elétrico entre as regiões da bobina e a superfície da ranhura, reduzindo a diferença de potencial nos vazios entre a bobina e o núcleo. A resistência superficial deve ser alta o suficiente para evitar o curto-circuito das lâminas do estator, pois o curto-circuito das lâminas provoca o aquecimento do núcleo devido ao aumento das correntes induzidas no material ferromagnético.

Figura 4 – Isolação duas camadas



Fonte: Stone G. C., Boulter E. A., Culbert E. A. B. I, Dhirani H. Electrical Insulation for Rotation Machines. Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair (2004).

RUX (2004) diz que após as bobinas serem inseridas no núcleo e o material de fechamento de ranhura aplicado, é então realizada a conexão entre as bobinas, tipicamente através do processo de brasagem. Essas conexões são então eletricamente isoladas e amarradas para evitar a vibração da cabeça de bobina durante a operação normal da máquina, como também evitar exigências que acontecem durante condições de curto-circuito. Os condutores dos estatores bobinados de grande seção transversal são subdivididos em caminhos por razões mecânicas e elétricas. Os caminhos deixam o condutor mais flexível e de fácil fabricação. Eles são isolados dos adjacentes para evitar o efeito pelicular da distribuição de corrente dentro do condutor e, desta maneira, diminuem as perdas por aquecimento. A isolação entre os caminhos deve ser confiável e capaz de suportar as altas temperaturas de operação (até 155 °C para um sistema de isolação classe F) conforme apresentado por NAIDU (1996). Embora a diferença de potencial entre caminhos adjacentes seja tipicamente poucos volts, um curto-circuito entre eles poderia resultar em perdas significantes e aquecer o condutor de cobre. O curto-circuito e o sobreaquecimento devido a falhas na isolação

podem, eventualmente, comprometer a integridade da isolação entre espiras e isolação principal.

RUX (2004) afirma que uma falha na isolação entre espiras pode rapidamente causar uma falha na máquina em função da alta corrente que circulará entre as espiras em curto-circuito, resultando numa alta temperatura no local. A alta temperatura pode fundir os caminhos de cobre e danificar a isolação principal, criando uma falha contra o núcleo, ou contra outra fase. Embora a tensão entre caminhos seja normalmente menor que 100 volts, níveis de tensão bem mais elevados e com frente de onda com período de tempo relativamente pequeno (na ordem de micro-segundos) são possíveis durante operações de chaveamento. Para máquinas elétricas de alta tensão, geralmente acima de 4.160 V, cada espira geralmente é isolada com fita de mica. Este material possui uma excelente rigidez dielétrica, incluindo a característica de ser imune à atividade de descargas parciais RUX (2004).

A isolação principal é aplicada sobre o condutor de cobre ou sobre a isolação entre as espiras para evitar o curto-circuito entre condutores energizados e o núcleo aterrado do estator. Segundo STONE (2004), a isolação principal pode ser aplicada usando tanto o método “Resin-Rich” ou o sistema de impregnação a vácuo e pressão (VPI). No sistema “Resin-Rich”, uma ampla porção de resina sintética é incorporada dentro da fita de mica, a qual é aplicada ao redor do condutor enquanto a resina ainda está maleável. A bobina é então aquecida individualmente sobre pressão até atingir a cura e formar um sólido e consolidado sistema de isolação nas dimensões apropriadas. O sistema de impregnação VPI possui uma etapa de vácuo responsável pela eliminação do ar entre as camadas das fitas, e outra etapa de pressão responsável por garantir completamente a troca do ar pela resina de alta rigidez dielétrica. Quando os vazios da isolação principal são preenchidos com resina, o enrolamento é retirado do tanque e aquecido para completar a cura da resina. Conforme mostrado por STONE (2004) durante a etapa de preenchimento das cavidades internas pela resina de alta permissividade elétrica relativa o valor da capacitância sofre um aumento até a estabilização. Durante o processo de cura a permissividade elétrica relativa do sistema de isolação decai até atingir um valor de aproximadamente 4.

2.2 – Materiais isolantes

As máquinas rotativas de alta tensão são tipicamente fabricadas usando principalmente a isolação epóxi-mica.

Os elementos químicos e a estrutura atômica dos materiais isolantes têm uma significativa influência no mecanismo de deterioração durante a operação da máquina, bem como na resposta do dielétrico observado durante ensaios dielétricos.

2.2.1 – Mica

A combinação única das propriedades físicas, térmicas e elétricas tem feito do material mica um importante componente do sistema de isolamento das máquinas de alta tensão. RUX (2004) mostra que a mica tem uma estrutura atômica que a capacita de ser dividida em finas folhas, enquanto mantém a flexibilidade, a dureza e a alta resistência à tração.

Conforme apresentado em MORA (2014), as duas classes mais utilizadas para finalidade elétrica são: mica ferro magnésia flogopita, também chamada de ambar ou mica prata, e a mica de potássio muscovita, chamada de índia, branca, rubi ou mica potassa.

A mica do tipo muscovita, conforme Figura 5, é produzida principalmente na Índia, Estados Unidos, África, e América do Sul. A resistividade da mica a 25°C varia em torno de 10^{12} a 10^{16} ohms.cm. O valor da resistividade depende, evidentemente, do grau de impurezas e é menor quanto maior for a temperatura. A mica muscovita ideal tem a seguinte composição química $KAl_2(Si_3AlO_{10})(OH)_2$ e possui aspecto luminoso. Suas cores mais comuns são branca, rubi, verde ou marrom.

Figura 5 – Mica muscovita



Fonte: Von Roll University, Insulation System Training (2007).

A mica flogopita, conforme Figura 6 cuja composição ideal é $KMg_3(Si_3AlO_{10})(OH)_2$, possui um aspecto opaco. Suas cores mais comuns são amarelo pálido, prata e marrom.

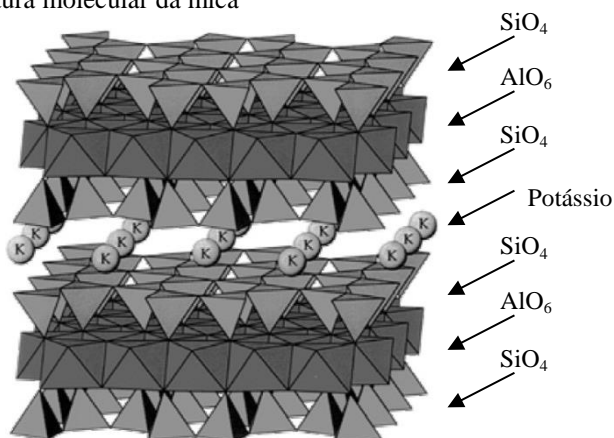
Figura 6 – Mica flogopita



Fonte: Von Roll University, Insulation System Training (2007).

Conforme VON ROLL (2007) a mica é composta por camadas, conforme mostrado na Figura 7. Na sua composição está uma estrutura tetraédrica do óxido de silício (SiO_4), que possui no centro da molécula um átomo de silício e na sua fronteira quatro átomos de oxigênio distribuídos simetricamente. A segunda camada, indicada como de AlO_6 , possui um átomo de alumínio no centro e sua fronteira é preenchida por 6 átomos de oxigênio.

Figura 7 – Estrutura molecular da mica



Fonte: Von Roll University, Insulation System Training (2007).

Entre as camadas de SiO_4 e AlO_6 existem átomos híbridos de oxigênio que são responsáveis pela ligação entre as duas camadas. A camada de íon de potássio localizada entre SiO_4 realiza uma ligação iônica entre o potássio e o oxigênio presente em SiO_4 . Na estrutura molecular da mica fica evidente a ligação entre as camadas, principalmente o átomo de silício com o oxigênio do octaedro do AlO_6 e a ligação iônica da camada de potássio com o elétron do tetraedro de SiO_4 .

Na estrutura molecular da mica demonstrada por RUX (2004), os dipolos permanentes são em maior quantidade em comparação com outros isolantes, mesmo na ausência de campo elétrico, fazendo com que as propriedades elétricas da mica sejam excelentes em relação aos outros materiais. Por causa dessa natureza polar, a mica apresenta uma permissividade elétrica relativa alta.

A rigidez dielétrica da mica é em torno de 160kV/mm, que corresponde ao valor máximo do gradiente do potencial que pode existir dentro do dielétrico sem atingir a ruptura do isolante. A Tabela 1 apresenta a permissividade elétrica relativa e a rigidez dielétrica de alguns materiais dielétricos.

Tabela 1 – Rigidez dielétrica dos materiais

Substância	Permissividade elétrica relativa K	Rigidez dielétrica kV/mm
Ar (1 atm)	1,00059	3
Baquelite	4,9	24
Mica	5,4	160
Neopreno	6,9	12
Óleo de transformador	4,5	12
Papel	3,7	16
Parafina	2,1-2,5	10
Poliestireno	2,55	24
Porcelana	7	5,7
Vidro (pirex)	4,7	14

Fonte: Mora, Nora Diaz. Apostila de Materiais Dielétricos (2014).

RUX (2004) demonstra que a elevada força de ligação interatômica possibilita que a mica seja quimicamente estável e inerte à ação da água, óleo, produtos alcalinos e ácidos. Uma das características mais importantes da mica é a resistência à erosão ocasionada por

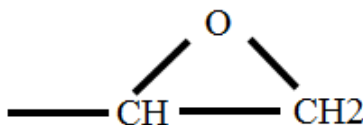
prolongadas descargas elétricas, sendo muito maior do que qualquer outro tipo de material flexível. Outro importante atributo para aplicações da mica em alta tensão e em alta potência é sua estabilidade térmica. Minerais de mica são a prova de fogo, não inflamáveis e completamente não afetados por temperaturas até 700°C. Pode ser submetida a temperaturas superiores, dependendo do tipo específico de mica.

2.2.2 – Epóxi

Impregnações e revestimentos epóxi têm sido largamente usados desde o fim dos anos 1940. Segundo NAIDU (1996), as resinas epóxi são valorizadas por sua alta resistência, sua boa adesão com a maioria dos materiais, incluindo metais, e sua resistência à umidade, aos solventes e a outros produtos químicos. O principal obstáculo para o aumento de sua aplicação é o seu alto custo.

DA SILVA (2005) diz que as resinas epóxi se caracterizam pela presença dos grupos epóxi na extremidade da cadeia, conforme apresenta a Figura 8.

Figura 8 – Grupo epóxi na extremidade da cadeia



Fonte: Da Silva, Guilherme Cunha, Descargas Parciais Estimuladas por Raios-X Contínuo e Pulsado em Materiais Dielétricos: Similaridades e Diferenças, (2005)

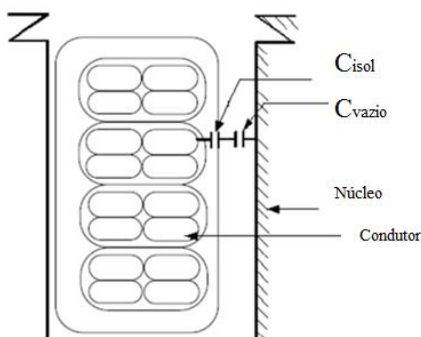
A resina epóxi sofre a transformação do estado líquido para um material termofixo sem retorno para a condição de fluido através de um procedimento chamado de cura. Esta cura é realizada através de um composto denominado endurecedor, que contém múltiplos grupos capazes de reagir com o grupo epóxi. Após a cura, o epóxi apresenta excelente resistência química, alta resistência mecânica, estabilidade dimensional e excelentes propriedades elétricas.

2.2.3 – Material a base de carbono

Para prevenir a ocorrência das descargas parciais na superfície das barras e das bobinas, materiais com características semicondutivas são aplicados. Essa camada semicondutiva é geralmente uma fita ou tinta à base de carbono. Essa proteção, frequentemente chamada de proteção semicondutiva, está em contato com a ranhura do núcleo ferromagnético ao longo do seu comprimento. As proteções semicondutivas geralmente possuem resistência superficial de 0,1 a $10\text{k}\Omega$ por cm^2 e diminuem a diferença de potencial entre a superfície da isolamento e o núcleo, e conseqüentemente, a tensão através da cavidade (veja Figura 9). Entre a isolamento e o núcleo, as descargas parciais não podem acontecer. O campo elétrico dentro do vazio não pode exceder 3kV/mm .

Deve-se levar em consideração de que a proteção semicondutiva não deve ser altamente condutiva, caso contrário irá colocar as lâminas do estator em curto-circuito. STONE (2004) diz que a razão pela qual as descargas parciais ocorrem entre a bobina e o núcleo é similar à razão pela qual as descargas parciais ocorrem nos vazios dentro da isolamento principal.

Figura 9 – Representação da capacitância da isolamento e do vazio entre bobina/barra e núcleo

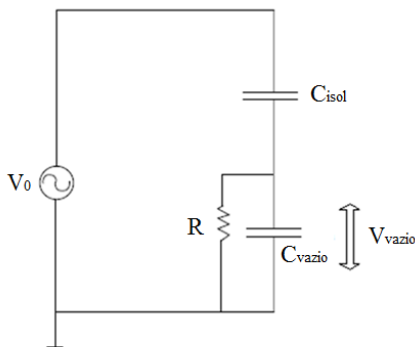


Fonte: Stone G. C., Boulter E. A., Culbert E. A. B. I, Dhirani H. Electrical Insulation for Rotation Machines. Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair (2004).

Uma vez que as bobinas ou barras são fabricadas fora do núcleo do estator, elas devem ter largura menor que a ranhura do núcleo ferromagnético, caso contrário, é impossível realizar a inserção. Se o campo elétrico exceder 3kV/mm dentro dos vazios (o efeito dos vazios são representados por C_{vazio} na Figura 9), as descargas parciais aparecerão. Essas descargas provocam a erosão da isolação levando a máquina à falha.

O circuito equivalente da isolação conforme STONE (2004) é mostrado na Figura 10. Os dois capacitores C_{isol} e C_{vazio} são relativos às capacitâncias da isolação sólida e do vazio, respectivamente. O resistor R em paralelo com C_{vazio} representa a perda por descarga parcial.

Figura 10 – Circuito equivalente da isolação



Fonte: Stone G. C., Boulter E. A., Culbert E. A. B. I, Dhirani H. Electrical Insulation for Rotation Machines. Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair (2004).

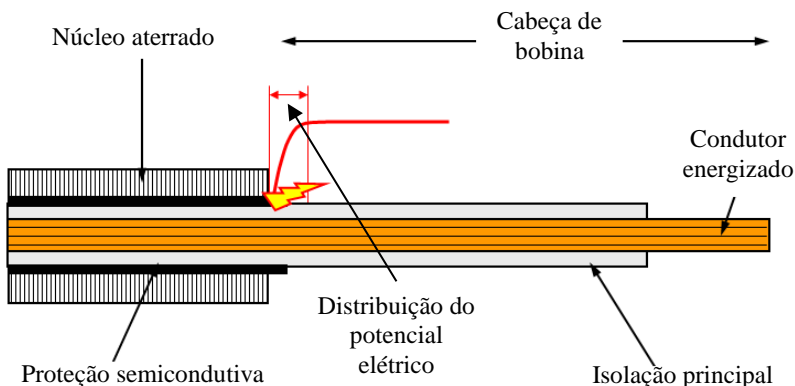
As proteções semicondutivas nas bobinas não são normalmente necessárias para máquinas com tensão nominal menor ou igual a 6kV. A ausência da proteção nesses casos está relacionado com a rigidez dielétrica do vazio (preenchido por ar) o qual não atinge 3kV/mm.

2.2.4 – Material a base de carbeto de silício

A proteção semicondutiva da superfície da bobina na região da ranhura geralmente é estendida por poucos centímetros além do fim do núcleo da máquina. Caso contrário, como diz STONE (2004), a superfície aterrada poderá estar próxima demais da região de conexão

entre as bobinas do estator. A região das conexões das bobinas é caracterizada por possuir uma quantidade grande de vazios devido ao processo de fabricação. E no caso em que a proteção semicondutiva estiver muito próxima desses vazios, o fenômeno de descargas parciais irá ocorrer. A proteção semicondutiva da ranhura não pode terminar abruptamente a poucos centímetros do fim do núcleo ferromagnético, pois essa fina camada irá gerar um aumento localizado do campo elétrico. A Figura 11 mostra uma configuração do sistema de isolamento em que a distribuição do potencial elétrico é menos uniforme, ou seja, sem atenuação do campo elétrico no fim do núcleo ferromagnético. Para esta configuração o campo elétrico irá exceder 3kV/mm e as descargas parciais irão ocorrer no fim da proteção semicondutiva.

Figura 11 – Sistema de isolamento sem atenuação do campo elétrico



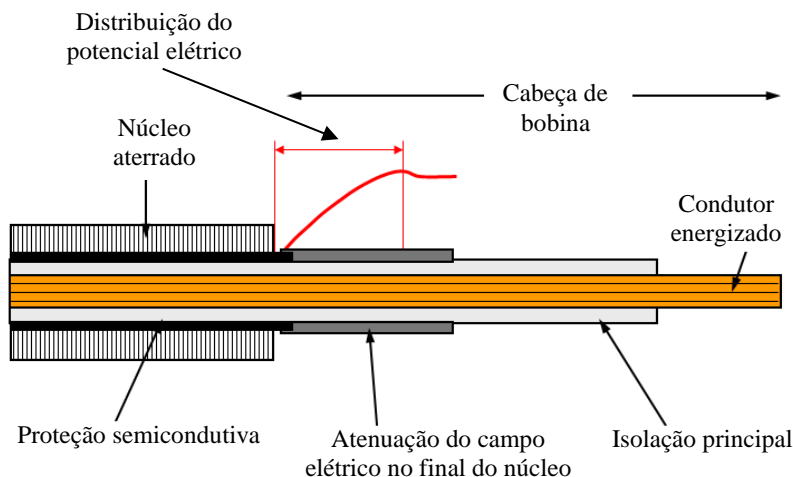
Fonte: Von Roll University, Insulation System Training (2006).

O carbeto de silício é um material que possui a propriedade de diminuir sua resistência quando a intensidade do campo elétrico aumenta. No passado, o carbeto de silício era usado em para-raios de alta tensão para desviar surtos de tensão devido às descargas atmosféricas, enquanto mantém as suas propriedades dielétricas durante a operação normal da linha de transmissão. Quando utilizado em enrolamentos de máquinas elétricas girantes, ele gradualmente aumenta sua resistência ao longo da direção da cabeça de bobina.

A utilização da camada de atenuação do campo elétrico, mostrada na Figura 12, com material a base de carbeto de silício

provoca uma variação da sua resistência e faz com que a distribuição do potencial elétrico seja mais suave, e consequentemente o campo elétrico no fim da proteção semicondutiva fica com amplitude mais uniforme.

Figura 12 - Sistema de isolamento com atenuação do campo elétrico



Fonte: Von Roll University, Insulation System Training (2006).

Na maioria das aplicações, o material semicondutor é misturado com uma tinta base, ou incorporado em uma fita que é aplicada na superfície da bobina ou barra. O comprimento da proteção superficial de carbeto de silício depende da tensão nominal da máquina, mas geralmente tem um comprimento de 5 a 10 cm. A proteção de carbeto de silício é também conhecida como "proteção gradiente".

2.3 – Considerações finais do capítulo

Este capítulo apresentou um resumo de um típico sistema de isolamento e os principais materiais utilizados em máquinas elétricas girantes de alta tensão. Para cada material foram apresentadas as características fundamentais e a empregabilidade de cada um deles ao longo da região do núcleo (o qual compõe o circuito magnético) e o ponto de transição entre núcleo e cabeça de bobina, onde está localizada a maior concentração e intensidade de campo elétrico.

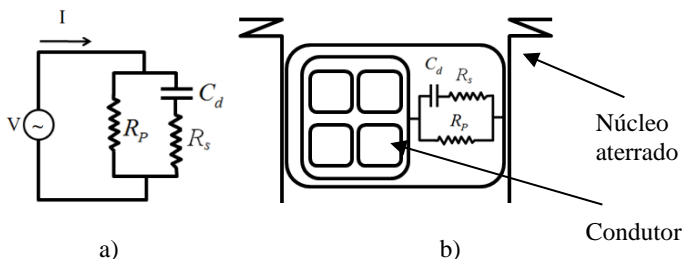
3 – PRINCIPAIS FENÔMENOS, O CIRCUITO EQUIVALENTE DO DIELÉTRICO DE UM ESTATOR DE UMA MÁQUINA DE ALTA TENSÃO E OS MÉTODOS DE ENSAIOS UTILIZADOS NA INVESTIGAÇÃO.

O capítulo apresenta as principais características elétricas de um sistema de isolamento e uma visão simplificada do circuito equivalente em função dos fenômenos físicos envolvidos, abordando os defeitos e as condições adversas que podem afetar as propriedades dielétricas dos materiais. Uma vez que variações nas propriedades dielétricas podem ser medidas, quantificadas e sua tendência definida, elas são frequentemente usadas nos diagnósticos da condição da isolamento. Este capítulo é baseado principalmente em RUX (2004), BASTOS (2008) e MACEDO (1988) e nos materiais de treinamento de caráter reservado aos engenheiros da empresa WEG. Apesar de não estar disponível na literatura, o conteúdo é importante e imprescindível para este trabalho e é sumariamente apresentado neste capítulo.

3.1 – O comportamento da isolamento através do ensaio “Off-Line”

O método de energização dos enrolamentos para realização de ensaios estáticos de avaliação dos dielétricos é conhecido por “Off-Line”. Ao se executar o ensaio “Off-line”, a fonte de tensão é conectada ao condutor do enrolamento, geralmente uma fase por vez, com as ligações do neutro abertas e as outras duas fases aterradas. O circuito equivalente está mostrado na Figura 13 (a).

Figura 13 – Circuito básico do dielétrico do estator bobinado



Fonte: IEEE 286-2000 IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation Coil Insulation (2000)

Para o circuito equivalente básico da isolamento principal, tem-se C_d como a capacitância do dielétrico, e R_P e R_S como resistores que representam as perdas do dielétrico para o núcleo ferromagnético. A perda pode ser puramente paralela, portanto $R_S = 0$ ou puramente série com $R_P = \infty$.

A representação real do dielétrico é complexa, pois tanto a resistência série quanto a resistência paralela possuem valores empregados entre 0 e ∞ , e o circuito equivalente poderá sofrer acréscimos dependendo do mecanismo de perda em questão. Os possíveis mecanismos serão apresentados ao longo do capítulo e demonstrará o circuito equivalente do sistema de isolamento por completo.

3.1.1 – Capacitância geométrica

A capacitância geométrica é estabelecida pela IEEE95 (2002) como a capacitância de um arranjo geométrico de eletrodos, onde o efeito da permissividade elétrica relativa de um sistema de isolamento foi incluído. Se as chapas são colocadas no vácuo e carregadas com cargas opostas $\pm Q$ na superfície, uma diferença de potencial V é desenvolvida através do capacitor, e tem-se a relação através da equação (1).

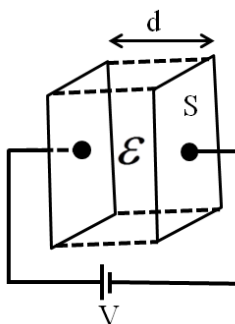
$$C = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

Em RUX (2004) é definido que a força imposta pelo campo elétrico \vec{E} atua no deslocamento de uma unidade de carga positiva para a placa com cargas negativas, e vice-versa. O módulo do campo elétrico é apresentado pela equação (2):

$$E = \frac{V}{d} \quad (2)$$

Se a superfície da área S do eletrodo é relativamente grande comparada ao distancia d entre eles, o campo elétrico \vec{E} será praticamente homogêneo e diretamente perpendicular à superfície das placas como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Capacitor de placas paralelas



Fonte: Bastos J. P. A. Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática (2008).

A capacitância, portanto, pode ser definida pela equação (3):

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \quad (3)$$

A capacitância geométrica do estator bobinado é uma função da geometria entre condutor e núcleo (por exemplo: tamanho, formato e espaçamento). Nos casos "reais", a capacitância geométrica é muito mais complicada de ser calculada, mas sumariamente, varia inversamente com a distância entre os eletrodos e diretamente com a área da superfície.

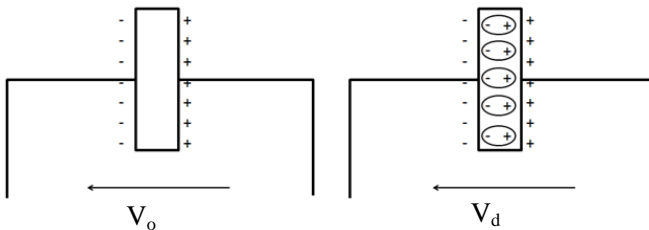
3.1.2 – Polarização dielétrica

O aumento da capacitância devido ao material dielétrico é tipicamente uma função da permissividade elétrica relativa do material conforme definida pela equação (4), onde ϵ é a permissividade elétrica do meio, e ϵ_0 é permissividade do vácuo ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m).

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (4)$$

Por definição, a permissividade relativa do vácuo é igual a 1. Para praticamente todos os materiais dielétricos, a permissividade relativa é maior que 1, pois é dependente da estrutura molecular do dielétrico, particularmente da polaridade dentro das moléculas.

Figura 15 – Capacitor no vácuo e com dielétrico



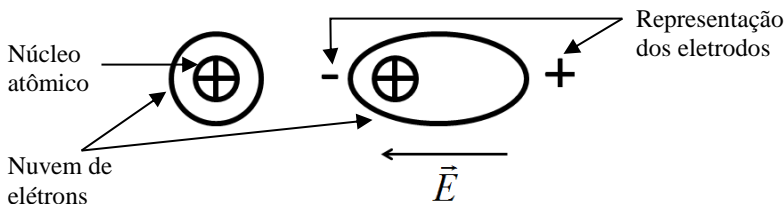
Fonte: Mora, Nora Diaz. Apostila de Materiais Dielétricos (2014).

A inserção do dielétrico apresenta alguns fenômenos físicos com impacto sobre as medições elétricas que serão apresentadas ao longo deste capítulo.

3.1.2.1 – Polarização eletrônica

Como mostrado por MORA (2010), o material físico do dielétrico consiste no núcleo atômico rodeado por nuvens de elétrons. Um campo elétrico externo causa um deslocamento da nuvem de elétrons ou se tornam levemente deslocados com referência ao núcleo positivamente carregado. Esse resultado é denominado como polarização eletrônica e ocorre em todos os materiais dielétricos, sem exceção. Na Figura 16 é mostrado que, com a aplicação do campo elétrico sobre o dielétrico, a nuvem de elétrons tem um ligeiro deslocamento na direção do eletrodo positivo, e no núcleo é deslocado na direção do eletrodo negativo.

Figura 16 – Polarização eletrônica



Fonte: Mora, Nora Diaz. Apostila de Materiais Dielétricos (2010).

Como o centro das cargas não é coincidente há a formação de um pequeno dipolo que contribui sobre a permissividade elétrica relativa. Com o aumento da temperatura, a expansão térmica geralmente diminui a densidade dos materiais dielétricos, diminuindo assim o número de átomos ou moléculas por unidade de volume e, como resultado, a polarização eletrônica sofre uma diminuição leve em seu valor com a redução da densidade.

3.1.2.2 – Polarização atômica

A aplicação de um campo elétrico externo também causará deslocamento de átomos e íons. Em RUX (2004) é apresentado que, quando diferentes tipos de átomos são mantidos juntos por ligações interatômicas, eles normalmente não compartilham elétrons simetricamente. A nuvem de elétrons irá se deslocar para o átomo com maior eletronegatividade e, então, o átomo adjacente pode adquirir cargas de polaridade oposta. Um campo elétrico externo agindo nessas cargas irá criar uma força que tende a mudar a posição de equilíbrio dos próprios átomos. O deslocamento de carga de átomos, ou grupo de átomos, resulta numa polarização atômica, como mostrado esquematicamente na Figura 17.

Figura 17 – Polarização atômica



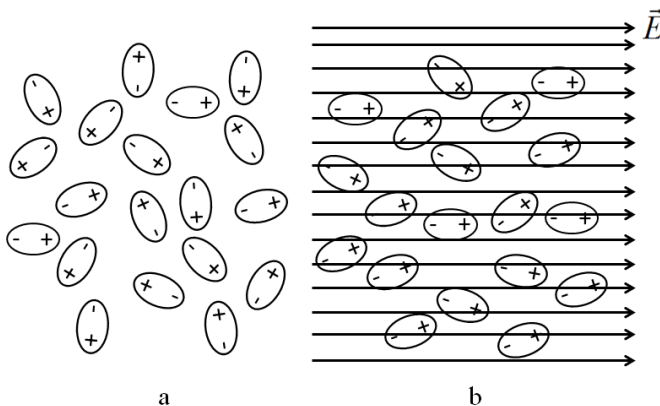
Fonte: Mora, Nora Diaz. Apostila de Materiais Dielétricos (2014).

Na faixa de frequência industrial (50/60Hz), entretanto, dielétricos geralmente exibem perda desprezível da polarização atômica.

3.1.2.3 – Polarização dos dipolos

RUX (2004) define que o arranjo assimétrico de cargas positivas e negativas cria o momento de dipolo permanente em algumas moléculas. Tais moléculas são denominadas por moléculas polares. Na ausência de campo elétrico, as moléculas polares não possuem alinhamento, e estão dispostas em todas as direções, pulando de uma orientação para outra devido à agitação térmica. Em todos os instantes, os dipolos são orientados aleatoriamente e nenhuma rede de momentos de dipolos será exibida. Com a aplicação de um campo externo, entretanto, o momento dos dipolos permanentes experimentam um torque que tende a orientá-los na direção do campo \vec{E} . Consequentemente, a polarização pode ocorrer, como ilustrado na Figura 18.

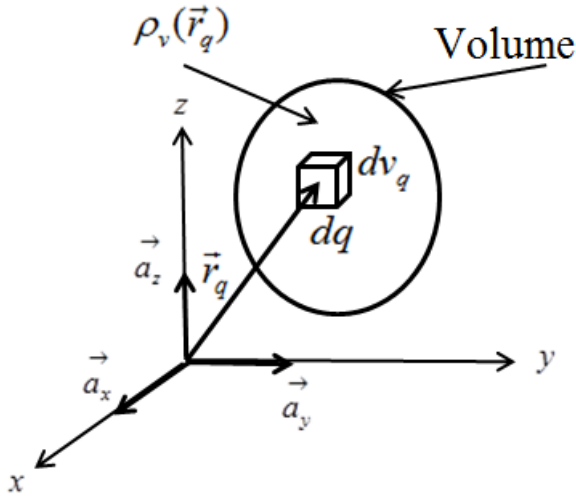
Figura 18 – Dipolos no interior de um dielétrico



Fonte: Mora, Nora Diaz. Apostila de Materiais Dielétricos (2014).

Para o entendimento do fenômeno da polarização dielétrica será necessário antes apresentar o momento do dipolo elétrico. Como mostra a Figura 19, para um determinado volume V ocupado por uma densidade volumétrica de cargas livres $\rho_v(\vec{r}_q)$, tem-se um vetor posição \vec{r}_q que possui a sua referência na origem.

Figura 19 – Distribuição de cargas



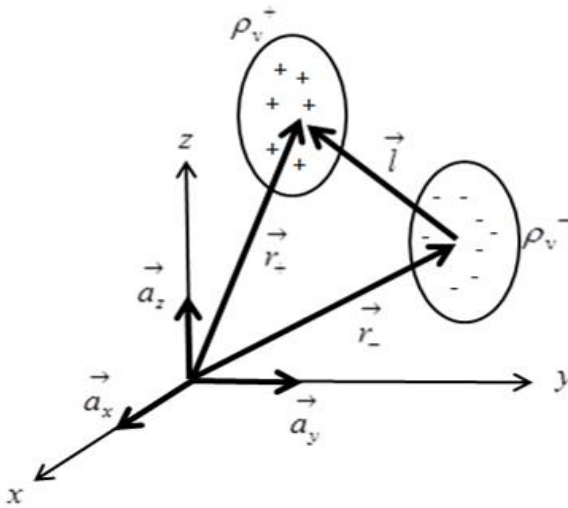
Fonte: Rüncos, Fredemar - Treinamento interno WEG (2012).

MACEDO (1988) diz que o momento de dipolo elétrico \vec{p}_e será definido pela integração da distribuição volumétrica de cargas livres $\rho_v(\vec{r}_q)$ em função do vetor posição das cargas definido por \vec{r}_q , no volume v_q , conforme a equação (5):

$$\vec{p}_e = \iiint_v \vec{r}_q \rho_v(\vec{r}_q) dv_q \quad (5)$$

Se a distribuição volumétrica de cargas for nula e o momento for não nulo, a distribuição pode ser definida como dipolo. Assim, o dipolo pode ser caracterizado por uma densidade volumétrica de cargas livres positivas ρ_v^+ e uma densidade volumétrica de cargas livres negativas ρ_v^- , conforme mostra a Figura 20.

Figura 20 – O dipolo elétrico



Fonte: Rincos, Fredemar - Treinamento interno WEG (2012)

Além das densidades volumétricas com sinais opostos, a Figura 20 mostra os vetores posição \vec{r}_+ e \vec{r}_- que ligam a origem até o centro das duas densidades volumétricas de cargas e o vetor \vec{l} que liga os dois centros de cargas.

O vetor posição \vec{r}_+ da densidade volumétrica de cargas livres positivas é definido pela equação (6):

$$\vec{r}_+ = \frac{\iiint_V \vec{r}_q \rho_v^+ \cdot (\vec{r}_q) dv_q}{\iiint_V \rho_v^+ \cdot (\vec{r}_q) dv_q} = \frac{1}{q^+} \iiint_V \vec{r}_q \rho_v^+ \cdot (\vec{r}_q) dv_q \quad (6)$$

e o vetor \vec{r}_- do centro de cargas livres negativa é definido pela equação (7),

$$\vec{r}_- = \frac{\iiint_V \vec{r}_q \rho_v^- \cdot (\vec{r}_q) dv_q}{\iiint_V \rho_v^- \cdot (\vec{r}_q) dv_q} = \frac{1}{q^-} \iiint_V \vec{r}_q \rho_v^- \cdot (\vec{r}_q) dv_q \quad (7)$$

Considerando que a momento do dipolo elétrico é a soma do momento do dipolo das cargas livres positivas \vec{p}_e^+ e negativas \vec{p}_e^- , tem-se a equação (8).

$$\vec{p}_e = \vec{p}_e^+ + \vec{p}_e^- \quad (8)$$

O momento do dipolo elétrico pode ser reescrito e definido pela equação (9)

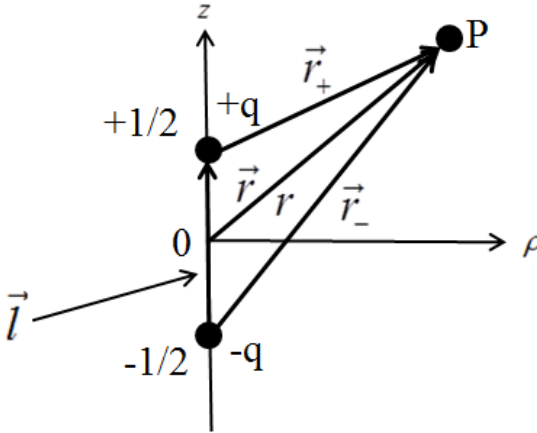
$$\vec{p}_e = \iiint_V \vec{r}_q \rho_v^+ \cdot (\vec{r}_q) dv_q + \iiint_V \vec{r}_q \rho_v^- \cdot (\vec{r}_q) dv_q \quad (9)$$

MACEDO (1988) considera que para uma distribuição dipolar as cargas são iguais $q^+ = -q^-$ e, portanto, o momento do dipolo elétrico mostrado na Figura 20 pode ser definido através da equação (10) apenas pela relação da carga com a distância \vec{l} e o módulo da carga total.

$$p_e = q(\vec{r}_+ - \vec{r}_-) = q\vec{l} \quad (10)$$

Para facilitar a determinação do potencial criado num certo ponto do espaço por um dipolo, MACEDO (1988) coloca o centro do dipolo na origem no sistema de coordenadas, conforme mostra a Figura 21, onde o eixo z está sobre o eixo do dipolo. Os vetores posição \vec{r}_+ e \vec{r}_- determinam a distância entre as cargas positiva e negativa e o ponto de observação P.

Figura 21 – O dipolo elétrico na origem do sistema de coordenadas



Fonte: Macedo, Annita. Eletromagnetismo (1988).

MACEDO (1988) considera que se a carga esteja no mesmo eixo, o potencial escalar elétrico para o dipolo elétrico é definido por:

$$\Phi_e(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} q \left(\frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right) \quad (11)$$

O potencial escalar pode ser reescrito pela equação (12) em função do vetor \vec{l} e do vetor \vec{r} mostrados da Figura 21 somente se o observador P estiver próximo ao dipolo ($r \approx l$).

$$\Phi_e(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} q \left(\frac{1}{\left| \vec{r} - \frac{\vec{l}}{2} \right|} - \frac{1}{\left| \vec{r} + \frac{\vec{l}}{2} \right|} \right) \quad (12)$$

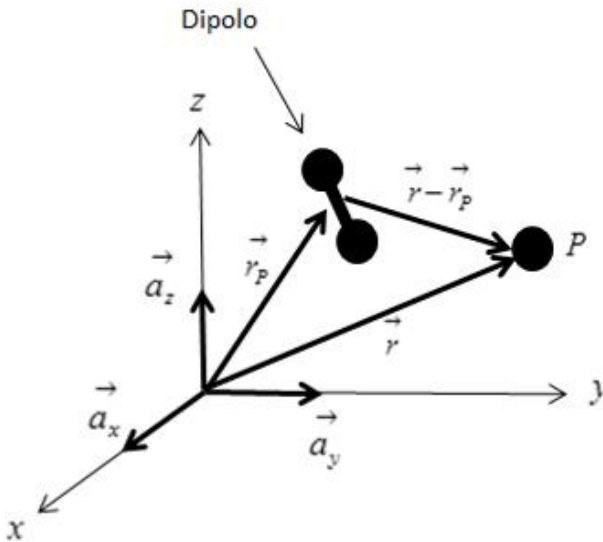
Supondo que o observador no ponto P da Figura 21 esteja muito distante do dipolo, ou seja, $\vec{r} \gg \vec{l}$, ou se o dipolo parecer muito pequeno $\vec{r} \ll \vec{l}$, MACEDO (1988) apresenta a aproximação do potencial escalar elétrico em função do momento de dipolo \vec{p}_e , da

distância r entre a origem e o observador, e o vetor posição \vec{r} através da equação (13).

$$\Phi_e(\vec{r}) = \frac{\vec{p}_e \cdot \vec{a}_r}{4\pi\epsilon r^2} \quad (13)$$

A Figura 22 mostra o dipolo distante da origem por \vec{r}_p , o observador distante do dipolo por $\vec{r} - \vec{r}_p$ e o observador distante da origem por \vec{r} .

Figura 22 – O dipolo elétrico



Fonte: Macedo, Annita. Eletromagnetismo (1988).

Para a equação (14), considera-se o vetor unitário como:

$$\vec{a}_r = \frac{\vec{r} - \vec{r}_p}{|\vec{r} - \vec{r}_p|} \quad (14)$$

Desta maneira, o potencial escalar no ponto \vec{r} e devido um dipolo puntiforme no ponto \vec{r}_p , é redefinido por MACEDO (1988) de maneira genérica pela equação:

$$\Phi_e(\vec{r}, \vec{r}_p) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{\vec{p}_e(\vec{r}_p) \cdot (\vec{r} - \vec{r}_p)}{|\vec{r} - \vec{r}_p|^3} \quad (15)$$

Para a análise do comportamento do dielétrico, além dos vetores indução elétrica \vec{D} e campo elétrico \vec{E} , deve-se introduzir um terceiro vetor polarização \vec{P} :

$$\vec{P} = \vec{D} - \epsilon_0 \vec{E} \quad (16)$$

A polarização está diretamente ligada à existência de um meio material e dielétrico, pois é nulo no vácuo e nos condutores onde $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$. Na eletrostática, a polarização é nula mesmo em meios condutores em que a permissividade não seja igual à do vácuo, uma vez que em todos eles $\vec{E} = 0$ e, consequentemente, $\vec{D} = 0$.

$$\vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} (\vec{D} - \vec{P}) \quad (17)$$

A lei de Gauss da eletricidade definida por BASTOS (2008) nas seções anteriores estabelece que $\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v$ e que aplicando o operador nabla na equação (18) o vetor polarização é reescrito por:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} (\nabla \cdot \vec{D} - \nabla \cdot \vec{P}) \quad (18)$$

Como $\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v$, tem-se:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_0} (\rho_v - \nabla \cdot \vec{P}) \quad (19)$$

A diferença entre a divergência do campo elétrico $\nabla \cdot \vec{E}$ no vácuo e um meio dielétrico é a parcela $\nabla \cdot \frac{\vec{P}}{\varepsilon_0}$. Desta maneira, define-se a densidade de cargas de polarização pela equação (20):

$$\rho_p = -\nabla \cdot \vec{P} \quad (20)$$

Assim a expressão (21) é reescrita, e tem-se:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_0} (\rho_v + \rho_p) \quad (21)$$

A equação de Poisson para o potencial escalar eletrostático apresentado por MACEDO (1988) é restrita para meios uniformes, onde $\varepsilon = \varepsilon_0$. Então, define-se:

$$\nabla^2 \Phi_e = -\frac{1}{\varepsilon_0} (\rho_v) \quad (22)$$

Adicionando a parcela da densidade de carga de polarização na equação de Poisson, tem-se:

$$\nabla^2 \Phi_e = -\frac{1}{\varepsilon_0} (\rho_v + \rho_p) \quad (23)$$

A equação do potencial escalar de uma distribuição genérica definida pela equação de onde $\varepsilon = \varepsilon_0$ e a densidade $\rho = \rho_v + \rho_p$, é dada por:

$$\Phi_e(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint_v \frac{\rho_v(\vec{r}_q) + \rho_p(\vec{r}_q)}{|\vec{r} - \vec{r}_q|} dv_q \quad (24)$$

Na equação (24), a influência do meio dielétrico fica mais evidente através da adição da parcela $\rho_p(\vec{r}_q)$.

Para uma distribuição superficial de cargas ρ_s apresentado na equação (25), o vetor deslocamento elétrico não é definido na superfície carregada, e sua superfície normal sofre uma descontinuidade que depende exclusivamente da existência de cargas superficiais.

$$\vec{n} \cdot \Delta \vec{D} = \rho_s \quad (25)$$

A componente do vetor polarização \vec{P}_p sofre um salto devido à diferença de permissividade. Para definir a relação entre os dois meios diferentes, tem-se o vetor polarização para o meio 1 na equação (26). :

$$\vec{P}_{p1} = \vec{D}_1 - \epsilon_0 \vec{E}_1 \quad (26)$$

Para o meio 2, o vetor polarização é definido por:

$$\vec{P}_{p2} = \vec{D}_2 - \epsilon_0 \vec{E}_2 \quad (27)$$

A relação entre os vetores polarização 1 e 2 é dada por:

$$\vec{n} \cdot \Delta \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} (\rho_s - \vec{n} \cdot \Delta \vec{P}_p) \quad (28)$$

Desta maneira, define-se a densidade superficial de carga de polarização ρ_{sp} como a parcela apresentada na equação (29).

$$\rho_{sp} = -\vec{n} \cdot \Delta \vec{P}_p \quad (29)$$

A relação entre o meio 1 e meio 2 é reescrita e tem-se:

$$\vec{n} \cdot \Delta \vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_0} (\rho_s + \rho_{sp}) \quad (30)$$

MACEDO (1988) apresenta que um dielétrico composto por materiais de diferentes permissividades apresentará uma componente adicional sobre o potencial escalar em função da densidade de cargas superficiais ρ_s . Desta maneira, a solução normalizada da equação de Poisson para o potencial escalar apresentada na equação (24) é reescrita por:

$$\Phi_e(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \left(\iiint_V \frac{\rho_v(\vec{r}_q) + \rho_p(\vec{r}_q)}{|\vec{r} - \vec{r}_q|} dv_q + \iint_S \frac{\rho_s(\vec{r}_q) + \rho_{sp}(\vec{r}_q)}{|\vec{r} - \vec{r}_q|} ds_q \right) \quad (31)$$

Da equação (31) tem-se o potencial escalar de cargas livres Φ_{e0} , criado em um determinado ponto, denominado pela equação (32):

$$\Phi_{e0}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \left(\iiint_V \frac{\rho_v(\vec{r}_q)}{|\vec{r} - \vec{r}_q|} dv_q + \iint_S \frac{\rho_s(\vec{r}_q)}{|\vec{r} - \vec{r}_q|} ds_q \right) \quad (32)$$

Para o potencial escalar de polarização Φ_{eP} , da equação (31), no mesmo ponto, tem-se:

$$\Phi_{eP}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \left(\iiint_V \frac{\rho_p(\vec{r}_q)}{|\vec{r} - \vec{r}_q|} dv_q + \iint_S \frac{\rho_{sp}(\vec{r}_q)}{|\vec{r} - \vec{r}_q|} ds_q \right) \quad (33)$$

MACEDO (1988) diz que a superposição do potencial é dada pela equação (34):

$$\Phi_e(\vec{r}) = \Phi_{e0}(\vec{r}) + \Phi_{ep}(\vec{r}) \quad (34)$$

Com a definição de densidade volumétrica de cargas de polarização dada pela equação (35):

$$\rho_p = -\nabla \cdot \vec{P} \quad (35)$$

A densidade superficial de cargas de polarização definida por:

$$\rho_{sp} = -\vec{n} \cdot \Delta \vec{P} \quad (36)$$

A equação normalizada de Poisson pode ser reescrita adicionando as equações (35) e (36) através da equação (37):

$$\Phi_e(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\iiint_V \frac{\rho_v(\vec{r}_q) - \nabla(\vec{r}_q) \cdot \vec{P}(\vec{r}_q)}{|\vec{r} - \vec{r}_q|} dv_q + \iint_S \frac{\rho_s(\vec{r}_q) - \vec{n}(\vec{r}_q) \Delta \vec{P}(\vec{r}_q)}{|\vec{r} - \vec{r}_q|} ds_q \right) \quad (37)$$

Dessa expressão do potencial, a parcela devida à polarização Φ_{ep} é separada novamente e se tem-se a equação (38):

$$\Phi_{ep}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\iiint_V \frac{-\nabla(\vec{r}_q) \cdot \vec{P}(\vec{r}_q)}{|\vec{r} - \vec{r}_q|} dv_q + \iint_S \frac{-\vec{n}(\vec{r}_q) \Delta \vec{P}(\vec{r}_q)}{|\vec{r} - \vec{r}_q|} ds_q \right) \quad (38)$$

Resolvendo a integral de volume e após algumas transformações, a expressão para o potencial escalar de polarização é reescrito em função do vetor polarização $\vec{P}(\vec{r}_q)$ através da equação (39):

$$\Phi_{ep}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \iiint_v \frac{\vec{P}(\vec{r}_q) \cdot (\vec{r} - \vec{r}_q)}{|\vec{r} - \vec{r}_q|^3} dv_q \quad (39)$$

Através da equação (15) do potencial escalar num dado ponto \vec{r} devido a um dipolo uniforme no ponto \vec{r}_p , é possível definir o potencial criado por um dipolo elementar, para uma distribuição contínua de dipolos, através da equação (40):

$$d\Phi_e(\vec{r}, \vec{r}_p) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{d\vec{p}_e(\vec{r}_p) \cdot (\vec{r} - \vec{r}_p)}{|\vec{r} - \vec{r}_p|^3} \quad (40)$$

Integrando a equação (40) em determinado volume V, o potencial devido a dipolo puntiforme fica definido em função do momento de dipolo elementar $d\vec{p}_e(\vec{r}_p)$, conforme mostrado na equação (41).

$$\Phi_e(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iiint_v \frac{d\vec{p}_e(\vec{r}_p) \cdot (\vec{r} - \vec{r}_p)}{|\vec{r} - \vec{r}_p|^3} \quad (41)$$

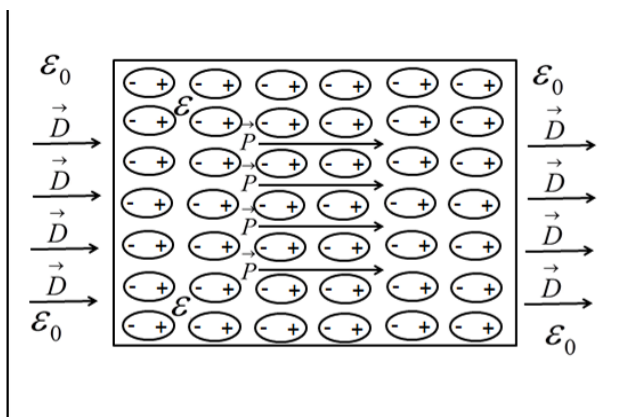
Por fim, é possível comparar as expressões (39) e (41), onde pode-se notar que $d\vec{p}_e(\vec{r}_p) = \vec{P}(\vec{r}_p) dV$, ou seja, MACEDO (1988) mostra que potencial escalar de polarização é igual ao potencial de uma distribuição contínua de dipolos no volume ocupado pelo dielétrico e define-se:

$$\vec{P} = \frac{d\vec{p}_e}{dV} \quad (42)$$

MACEDO (1988) diz que um campo elétrico externo aplicado a um dielétrico induz neste uma polarização, isto é, induz uma distribuição contínua de dipolos elementares. Como o campo é proporcional a $1/\varepsilon$ e como $1/\varepsilon < 1/\varepsilon_0$, essa indução acarreta, em cada ponto do dielétrico, uma redução na intensidade do campo resultante em relação ao campo externo aplicado. Isso significa que os dipolos ficam dispostos de maneira a enfraquecer a intensidade do campo aplicado.

A Figura 23 apresenta uma visão microscópica do dielétrico sob influência de um campo elétrico externo. Como as moléculas do dielétrico, em geral neutras, são constituídas de partículas carregadas, a aplicação de um campo elétrico ocasiona uma separação entre os centros das cargas positivas e negativas de cada molécula.

Figura 23 – Polarização do dielétrico



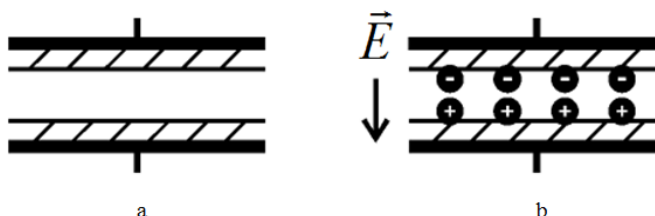
Fonte: Macedo, Annita. Eletromagnetismo (1988).

Os dipolos são induzidos, alinham-se com o campo externo de modo que as cargas negativas fiquem mais próximas das fontes positivas e as cargas positivas mais próximas das fontes negativas. Dentro de certo volume dV , passa haver certo momento de dipolo elementar $d\vec{p}_e$ e, portanto, a polarização.

3.1.2.4 – Polarização por cargas espaciais

Segundo MORA (2010), as cargas espaciais são aquelas que se situam nas interfaces e são randomicamente causadas por radiação, deterioração térmica ou aquelas absorvidas no material durante o processamento. Este tipo de polarização acontece quando uma das faces presentes possui resistividade muito diferente da outra. Um campo elétrico externo aplicado pode causar um acúmulo de cargas elétricas nas interfaces entre as faces. A polarização de cargas espaciais é ilustrada na Figura 24.

Figura 24 – Polarização Interfacial: a) sem campo elétrico aplicado e b) com campo elétrico aplicado



Fonte: Rux L.M., The Physical Phenomena Associated with Stator Winding Insulation Condition as Detected by the Ramped Direct High-Voltage Method. 2004

3.1.3 – O tempo de relaxação da polarização dielétrica

RUX (2004) define que cada tipo de polarização dielétrica é caracterizado pelo tempo de relaxação τ e que ele representa o tempo tomado pela polarização em resposta ao campo elétrico aplicado. A polarização eletrônica se estabelece em um tempo $\tau_e = 10^{-16}$ segundos. Os átomos são relativamente mais pesados e um pouco mais lentos para responder, portanto, o tempo de relaxação da polarização atômica τ_a é da ordem de 10^{-12} a 10^{-13} segundos. Os dipolos e cargas de polarização espacial são maiores em virtude da inércia do dipolo e do tempo de transporte da carga carregada. O tempo de relaxação da orientação do dipolo τ_d depende da estrutura das moléculas, do estado do material e da temperatura, possuindo geralmente uma faixa de tempo de 10^{-3} a 10^{-10} segundos. O tempo de relaxação de polarização cargas espaciais

depende da condutividade e do arranjo dos componentes que constituem o dielétrico, mas é geralmente lento e na ordem de 10^{-3} segundos.

Quando cada mecanismo de polarização cessa de operar, há uma queda na permissividade elétrica relativa. Apenas a polarização eletrônica é um processo suficientemente rápido para acompanhar as mudanças de orientação de um campo elétrico alternado.

3.1.4 – Permissividade complexa e a tangente de perdas

Da lei de Ampère sob a forma fasorial para meios lineares, isotrópicos e homogêneos, tem-se:

$$\text{rot} \vec{H} = (\sigma + j\omega\epsilon) \vec{E} \quad (43)$$

Aplicando algumas operações matemáticas, a equação (43) pode ser reescrita por:

$$\text{rot} \vec{H} = (\sigma + j\omega\epsilon) \vec{E} = j\omega\epsilon \left[1 - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon} \right] \vec{E} = j\omega\epsilon^* \vec{E} \quad (44)$$

onde

$$\epsilon^* = \epsilon \left[1 - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon} \right] \quad (45)$$

ou

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (46)$$

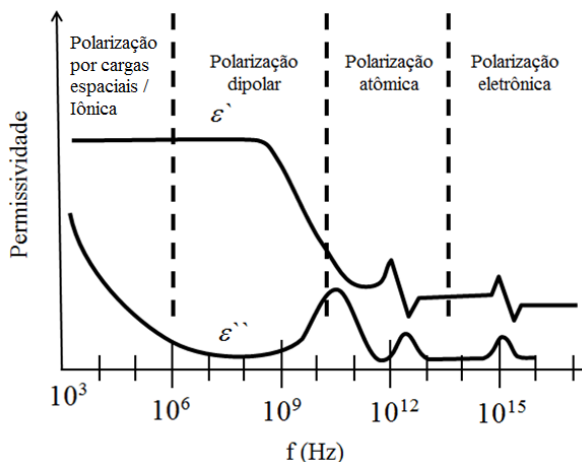
Para a equação (46) o termo ϵ^* é a permissividade relativa complexa, $\epsilon = \epsilon'$ e $\epsilon'' = \sigma / \omega$. É apresentado por NICOLAU (2005) que a parte real ϵ' está relacionada com a capacidade de armazenar energia e outra imaginária ϵ'' é o fator de perdas ou dissipação.

RUX (2004) estabelece que quanto menor for o valor de ϵ'' mais o material se aproxima da condição de ser um isolador perfeito. A tangente do ângulo de perda é definida por.

$$\tan \delta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (47)$$

Quando um campo elétrico alternado de frequência f é aplicado ao material dielétrico, cada tipo de polarização contribui totalmente para polarização se o período de oscilação do campo elétrico externo $t=1/f$ for muito maior que o tempo de relaxação dos mecanismos de polarização. Desta maneira, cada mecanismo terá a sua contribuição antes que o campo elétrico externo seja revertido. É definido por RUX (2004) que, quando a frequência do campo elétrico externo f é da ordem de $1/\tau$, a polarização é apenas parcialmente estabelecida antes da inversão do campo e, conseqüentemente existe um decréscimo na contribuição da permissividade. Quando f é muito maior que $1/\tau$, a polarização se torna inoperante e é incapaz de responder às rápidas inversões do campo elétrico e deixam de contribuir sobre ϵ' . A variação de ϵ' com a frequência, é chamada de curva de dispersão, mostrada na Figura 25.

Figura 25 – Variação da permissividade elétrica relativa e índice de perdas em função da frequência de um campo elétrico alternado.



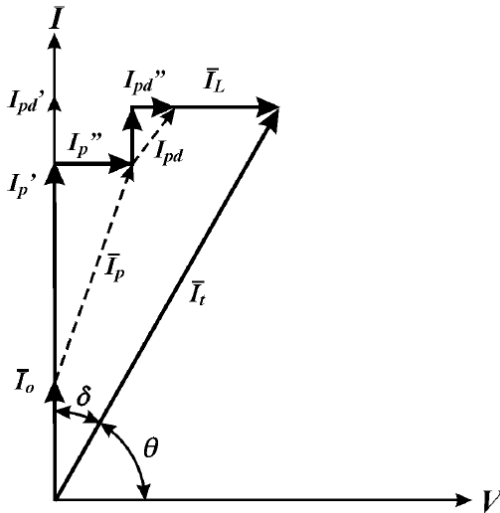
Fonte: Nucci A. M, Estudo de propriedades dielétricas de sistema epóxi-anidrido, (2005).

A Figura 25 mostra que à medida que a frequência do campo elétrico externo sofre um aumento, o tempo necessário para a reorientação do dipolo ou o tempo para uma carga se movimentar não é suficiente para completar o ciclo de polarização. O índice de perdas ϵ''

também varia com a frequência e tem aumento mais considerável devido à polarização por cargas espaciais.

O resultado da corrente medida no dielétrico do estator é definido por RUX (2004) e apresentada na Figura 26 pela composição da carga da capacitância geométrica I_o , polarização dielétrica I_p , condução pela superfície e no volume I_L , componentes da corrente de polarização e I_{pd} devido o efeito da atividade das descargas parciais I_{pd} .

Figura 26 – Perdas no dielétrico



Fonte: Ruz L.M. - The Physical Phenomena Associated with Stator Winding Insulation as Detected By The Ramped Direct High Voltage Method (2004)

A avaliação destes componentes, através da determinação da tangente do ângulo de perdas, conforme proposto pela IEEE286(2000), tem provado serem úteis em determinar a qualidade e a condição do sistema de isolamento.

Considerando que a corrente \bar{I}_t está adiantada em relação à tensão aplicada V em um ângulo θ , o fator de potência do dielétrico é definido por:

$$FP = \cos \theta \quad (48)$$

O ângulo δ é denominado ângulo de perdas do dielétrico. O fator de potência FP pode ser escrito em função deste ângulo através de:

$$FP = \text{Sen} \delta \quad (49)$$

As perdas em Watts no dielétrico P_d geradas pela imposição da tensão alternada V com frequência constante, a partir do diagrama fasorial mostrado na Figura 26, são calculadas pela equação (50).

$$P_d = VI_t \text{Cos} \theta = VI_t \text{Sen} \delta \quad (50)$$

Com base no diagrama fasorial, a corrente resultante do dielétrico pode ser definida por:

$$I_t = \frac{I'_p + I'_{pd}}{\text{Cos} \delta} \quad (51)$$

A soma dos vetores \bar{I}_p e \bar{I}_{pd} está adiantada em $\pi/2$ radianos em relação à tensão aplicada e pode ser calculada em função da reatância capacitiva. Tem-se então:

$$I'_p + I'_{pd} = \frac{V}{X_d} = 2\pi f C_d V \quad (52)$$

$$I_t = \frac{2\pi f C_d V}{\text{Cos} \delta} \quad (53)$$

Para a equação (53), f é a frequência da tensão aplicada e C_d é a capacitância do dielétrico. Por fim, as perdas dielétricas podem ser calculadas por:

$$P_d = V \frac{2\pi f C_d V}{\text{Cos} \delta} \text{Sen} \delta = 2\pi f C_d V^2 \tan \delta \quad (54)$$

Assim, quando uma tensão alternada, com frequência constante, é imposta a um dielétrico, as perdas dielétricas são proporcionais à

frequência e ao quadrado do valor eficaz da tensão imposta. A capacitância do dielétrico por sua vez depende da permissividade do material que constitui o dielétrico e é também proporcional à tangente do ângulo de perdas do dielétrico.

Conforme demonstrado pela IEEE286 (2000), durante os ensaios em uma bobina ou barra, as variações sobre a tangente do ângulo de perdas provocadas pela variação de tensão de ensaio podem tanto estar associadas às propriedades do dielétrico ou com a atividade de descargas parciais. As perdas dielétricas geralmente apresentam pequenas variações nos valores, conforme curva de Tip Up e $\Delta \tan \delta$ da IEEE286(2000). Os termos Tip Up e $\Delta \tan \delta$ são utilizados internacionalmente para estabelecer limites para as perdas. O Tip Up define limite das perdas dielétricas entre dois níveis distintos e normalmente é definido pela média entre 20% e 60% da tensão da tensão nominal. O critério $\Delta \tan \delta$ estabelece limites para as perdas dielétricas para cada degrau da tensão de ensaio, normalmente cada degrau corresponde a 20% da tensão nominal.

É difícil de analisar o efeito de cada problema da isolação sobre o comportamento dos valores da $\tan \delta$ como uma função da tensão aplicada. Entretanto, há uma correlação dos valores da $\tan \delta$ com a atividade das descargas parciais (taxa e magnitude).

Para demonstrar a contribuição da atividade de descargas parciais no valor da tangente delta, a norma IEEE 286(2000) apresenta a equação (55). Nesta equação, C_d é a capacitância do dielétrico ideal, C_d' a capacitância relativa à amostra sobre teste possuindo apenas perdas dielétricas, C_d'' a capacitância da amostra incluindo atividade de descargas parciais. A tensão $V_j(t)$ é o valor instantâneo de tensão aplicada correspondente ao início da atividade de descargas parciais, cuja amplitude da descarga é ΔV_{cj} . A atividade de descarga parcial possui n_j pulsos por segundo.

$$2\pi f C_d V^2 \tan \delta = 2\pi f C_d' V^2 \tan \delta' + C_d'' \sum_{j=1}^n n_j \Delta V_{cj} V_j(t) \quad (55)$$

Reescrevendo a equação (55) para determinar a tangente do ângulo de perdas, tem-se.

$$\tan \delta = \frac{C_d' \tan \delta}{C} + \frac{C_d''}{2\pi f C V^2} \sum_{j=1}^n n_j \Delta V_{cj} V_j(t) \quad (56)$$

Uma vez que a tensão de ensaio atinge o nível necessário para romper a rigidez dielétrica do gás dentro das cavidades, como será visto na seção 3.1.5, a atividade de descargas parciais é iniciada e o valor de $\tan \delta$ sofre um incremento. Uma vez que todos os vazios se tornam ionizados e são descarregados, o valor de $\tan \delta$ pode apresentar outro comportamento e tenderá a decrescer o valor das perdas dielétricas.

3.1.5 – Condução

A corrente de condução ou corrente de fuga observada durante os ensaios de isolamento é tratada na norma IEEE95 (2002) como sendo a soma das correntes medidas quando uma tensão é aplicada, e que passa pelo volume e pela superfície da isolamento. Os valores relativos de condução de volume e de superfície dependem da temperatura, umidade, contaminação e intensidade do campo elétrico, bem como da qualidade e da condição da isolamento que está sendo testada.

A condução elétrica através de dielétricos é definida por RUX (2004) predominantemente por átomos que perdem ou ganham elétrons, e são denominados íons. A presença de impurezas iônicas tais como absorção de umidade ou resíduos de catalisador, vazios no volume do material isolante e cargas espaciais presas, podem resultar em um fluxo iônico de corrente durante a aplicação de alto valor de campo elétrico. Condução eletrônica é muito menos provável de ocorrer por causa dos fortes elos entre os elétrons externos e o núcleo atômico do átomo isolador. Entretanto, em situações onde a isolamento tem sido contaminada por poeira, óleo ou umidade, a condução eletrônica pode ocorrer com maior probabilidade.

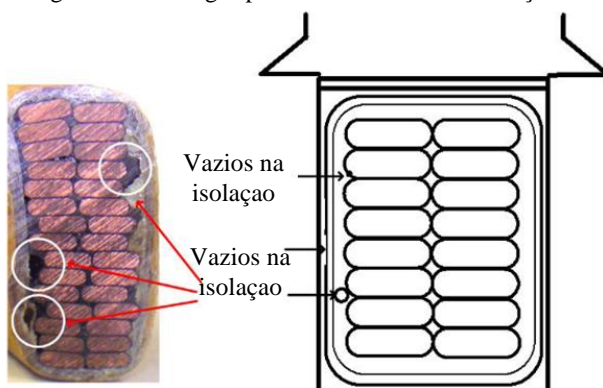
Como a isolamento começa a envelhecer e a enfraquecer, ou sua superfície começa a se tornar contaminada, a condutividade pode aumentar, produzindo um aumento mensurável na corrente de condução durante o ensaio de tensão aplicada. Um aumento significativo e sustentável na corrente de condução com o aumento do valor da tensão de teste pode indicar sérios problemas, tais como uma falha ou trincas na isolamento principal. Quando o campo elétrico é aplicado e se aproxima do nível de ruptura do isolante, a corrente de condução aumenta

exponencialmente e é evidenciada por um degrau positivo da resposta de corrente.

3.1.6 – Descargas parciais

O fenômeno descargas parciais é definido pela IEEE1434 (2000) como a ionização que ocorrem em cavidades, conforme mostra a Figura 27, de um gás (vazios) dentro da isolação sólida ou em espaços gasosos adjacentes ao condutor.

Figura 27 – Origem das descargas parciais no sistema de isolação

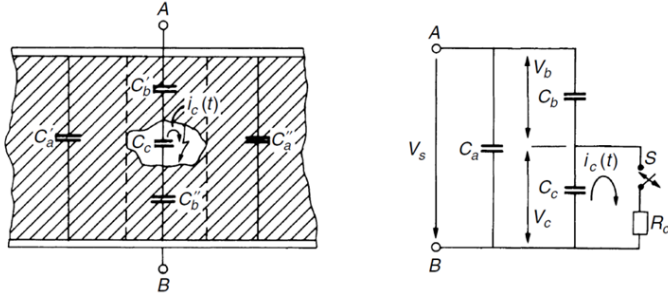


Fonte: Haq S. U. A Study on Insulation Problems in Drive Fed Medium Voltage Induction Motors (2007).

Quando o campo elétrico excede um valor crítico, um transitório repentino de descargas elétricas acontece. Uma vez que a descarga elétrica dentro da cavidade não é contínua, pois acontece a cada semi-ciclo, ela é considerada descarga parcial.

KUFFEL (2000) apresenta que o sistema de isolação de uma máquina elétrica de alta tensão com descargas parciais pode ser comparado a um capacitor composto pelo material sólido entre dois eletrodos denominados A e B e uma cavidade preenchida por um gás, conforme Figura 28. Este vazio irá dar origem à atividade de descargas parciais se a tensão aplicada sobre os eletrodos for aumentada.

Figura 28 – Circuito equivalente da descarga parcial



Fonte: Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J.,
High Voltage Engineering (2000).

O fenômeno da descarga parcial na cavidade pode ser simulado pelo circuito equivalente mostrado na Figura 28. A chave S é controlada pela tensão V_c através da capacitância do vazio C_c . A chave S “fecha” apenas por um curto período de tempo, durante os quais o fluxo da corrente de $I_c(t)$ acontece. O resistor R_c simula o período de tempo durante o qual a descarga se desenvolve e é completada. A corrente de descarga $I_c(t)$ não pode ser medida, pois geralmente é estabelecida somente em um curto pulso de nanosegundos.

Supondo que a amostra foi carregada com a tensão V_a , mas os terminais A e B não estão ligados permanentemente a uma fonte de tensão, quando o interruptor S é fechado e C_c fica completamente descarregada, a corrente $I_c(t)$ libera uma carga $\delta q_c = C_c \delta V_c$ de C_c . Ao comparar as cargas dentro do sistema antes e após esta descarga parcial, é possível verificar uma queda de tensão através dos terminais A e B conforme equação (57):

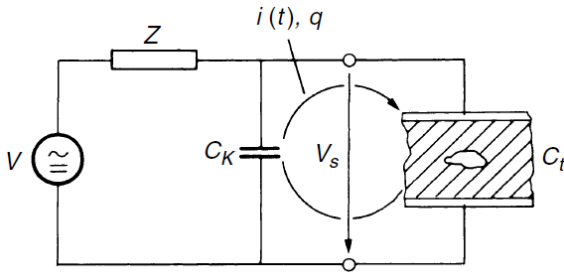
$$\delta V_a = \frac{C_b}{C_a + C_b} \delta V_c \quad (57)$$

A queda de tensão δV_a não contém informações sobre a carga δq_c apesar da relação com $C_b \delta V_c$. KUFFEL (2000) estabelece que a queda de tensão δV_a é uma quantidade que pode ser medida, mas que tem uma magnitude pequena quando comparada a tensão δV_c dentro da

cavidade. A queda de tensão δV_a é um degrau de tensão negativa com tempo de subida que depende do intervalo de tempo que a corrente $I_c(t)$ circulará por R_c do circuito da Figura 28. O valor de δV_c dentro da cavidade é geralmente da ordem de 10^2 a 10^3 V.

Os circuitos de detecção são baseados conforme mostrado na Figura 29. O objeto de teste é ligado a uma fonte de tensão V , em geral uma fonte de corrente alternada e Z é a impedância do cabo entre a fonte externa a o capacitor C_K . Em seguida um capacitor C_K é conectado em paralelo com a amostra.

Figura 29 – Circuito de medição da descarga parcial



Fonte: Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J.,
High Voltage Engineering (2000).

O capacitor C_K libera o pulso de corrente de descarga parcial $i(t)$ entre C_K e C_t e tenta cancelar a queda de tensão δV_a através de $C_t \approx (C_a + C_b)$. Se $C_K \gg C_t$, δV_a é completamente compensada e a carga fornecida pelo pulso de corrente $i(t)$ é dada por:

$$q = \int i(t) = (C_a + C_b) \delta V_a = C_b \delta V_c \quad (58)$$

Essa carga q é chamada de carga aparente de um pulso de descarga parcial, que é a grandeza fundamental para a medição de descargas parciais. A palavra aparente foi introduzida, pois não é uma carga igual à quantidade de carga na cavidade C_c , mas é muito mais realista do que a queda de tensão δV_a da equação (57), pois na isolação

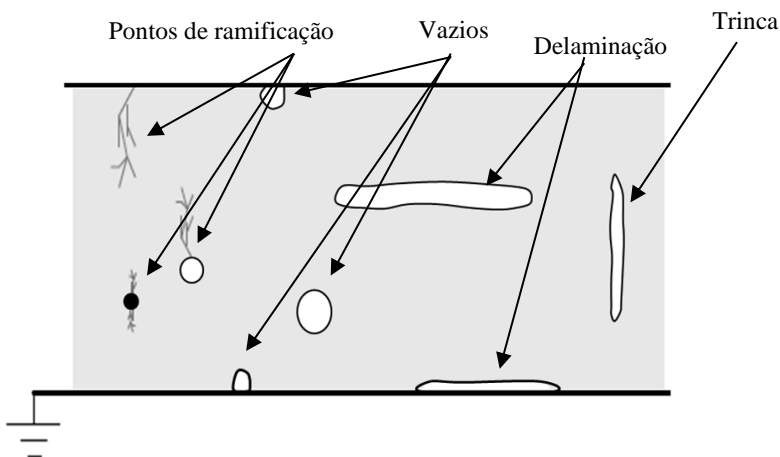
$C_a \gg C_c \gg C_b$, onde C_a é a capacitância da isolação sem cavidades, tem o maior valor e não tem relação com a carga medida na equação (58).

De acordo com TAYLOR (2010), considerando que a cavidade é preenchida por um gás em uma isolação com permissividade relativa ε_r e com um campo \vec{E} aplicado sobre a isolação, define-se que o campo elétrico \vec{E}_{CAV} dentro da cavidade é dado por:

$$\vec{E}_{CAV} = \varepsilon_r \vec{E} \quad (59)$$

Na Figura 30 são apresentadas, TAYLOR (2010), as possíveis cavidades presentes em uma isolação para alta tensão. A delaminação é geralmente localizada entre as camadas de fita de isolação. Os vazios possuem um aspecto semelhante ao de uma bolha e possivelmente são provocados por falha no processo de impregnação. Transversalmente ao sentido de aplicação da fita de isolação é possível verificar a representação de uma trinca. Os pontos de ramificação têm propagação em direções indefinidas e tendem a buscar falhas microscópicas para manter a sua progressão até a ruptura da isolação

Figura 30 – Classificação aproximada das descargas parciais



Fonte: Taylor N. Dielectric Response and Partial Discharge Measurements on Stator Insulation at Varied Low Frequency (2010)

A cavidade esférica (vazios), conforme pode ser observado na Figura 30, possuem campo elétrico interno \vec{E}_{CAV} estabelecido como:

$$\vec{E}_{CAV} = \frac{3\epsilon_r \vec{E}}{2\epsilon_r + 1} \quad (60)$$

As trincas na isolação possuem um campo elétrico \vec{E}_{CAV} conforme equação (61).

$$\vec{E}_{CAV} = \vec{E} \quad (61)$$

Durante a operação normal da máquina elétrica o campo elétrico dentro da isolação sólida é maior que a rigidez dielétrica do gás dentro da cavidade. Nas equações acima é possível verificar que o campo elétrico \vec{E}_{CAV} sobre as cavidades denominadas delaminação e vazio é ainda mais intenso, considerando que o valor da permissividade relativa ϵ_r para uma isolação de alta tensão é de aproximadamente 4.

TAYLOR (2010) apresenta através da lei de Paschen a descrição empírica da tensão necessária para se atingir a ruptura de um gás sob condições normais de temperatura e pressão (CNTP). Essa tensão é de no mínimo 330V, para $pd = 10^{-2} \text{ bar.mm}$ e é definida por:

$$V_B \approx 2,13\sqrt{pd} + 2,44pd \quad (62)$$

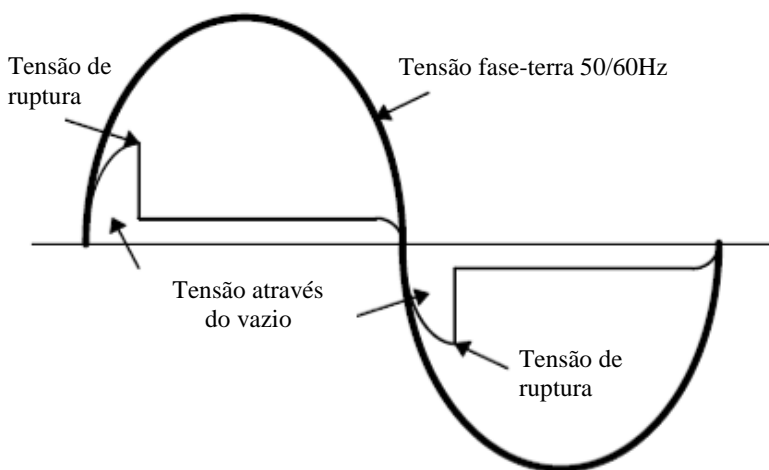
Na equação (62), o termo pd é o produto da pressão interna do vazio, em bar, e a distância entre dois eletrodos em milímetros. Um evento de descargas parciais cria íons positivos e negativos a serem depositados nas faces opostas da cavidade.

TAYLOR (2010) diz que durante a avalanche de elétrons um elétron livre é acelerado pela influência do campo elétrico e colide com átomos ou moléculas neutras. Durante esta colisão um íon positivo será criado e elétrons livres adicionais serão liberados pela energia da incidência dos elétrons com o átomo neutro. Os íons móveis e elétrons continuam a ganhar energia cinética do campo elétrico \vec{E} permitindo mais colisões moleculares e eventualmente resultando numa passagem de corrente através do gás. Dentro do vazio, o campo do dipolo se opõe

ao externo \vec{E} até que o campo resultante dentro da cavidade se torne baixo suficiente para extinguir as descargas.

Descargas parciais podem ocorrer sob campo alternado ou contínuo, e também sob condições de impulso. WARREN (2007) estabelece que durante a operação normal, ou quando executado ensaio “*Off-Line*” com tensão alternada, as descargas parciais geralmente ocorrem perto do pico da senóide de tensão. A Figura 31 mostra que quando o campo elétrico excede a rigidez dielétrica do gás dentro da cavidade a descarga parcial irá ocorrer. Quanto maior o tamanho da cavidade maior será a descarga. O pulso de descarga parcial possui uma frente de onda extremamente rápida, cerca de 5ns e é classificada por WARREN (2007) como negativa durante o primeiro quadrante do ciclo de rede e positiva no terceiro quadrante.

Figura 31 – Ocorrência das descargas parciais



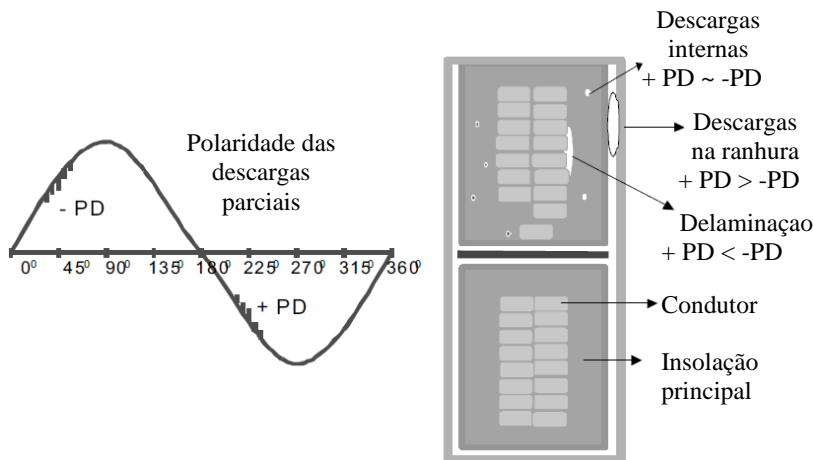
Fonte: Warren V., Stone G.C., Kantardziski
 PARTIAL DISCHARGE TESTING AS A
 PREDICTIVE MAINTENANCE TOOL FOR
 HYDRAULIC GENERATORS (2010)

RUX (2004) estabelece que, embora o local da corrente de descargas não pode ser diretamente registrado por um circuito de medição externo, a queda de tensão devido à descarga parcial causa uma rápida transferência de cargas para o terminal do objeto de teste. Assim,

a carga aparente pode ser medida e usada para avaliar a qualidade e a condição do sistema de isolamento. A maioria dos instrumentos de medição de descargas parciais é projetada para detectar a migração ou movimento de elétrons.

Existem varias possibilidade de haver locais de descargas parciais em máquina elétricas girantes. A Figura 32 mostra os locais onde tipicamente é possível ocorrer descargas parciais e os caracteriza pela comparação entre as magnitudes das descargas positivas e negativas. Para cavidades localizadas entre o condutor e o núcleo as descargas positivas, +PD, tem aproximadamente a mesma magnitude das descargas negativas, -PD. Quando as cavidades estão mais próximas do condutor a magnitude das descargas positivas é maior que as negativas. Para descargas parciais próximas ao núcleo a magnitude das descargas positivas é menor que a magnitude das descargas negativas.

Figura 32 – Posição das descargas parciais e sua polaridade

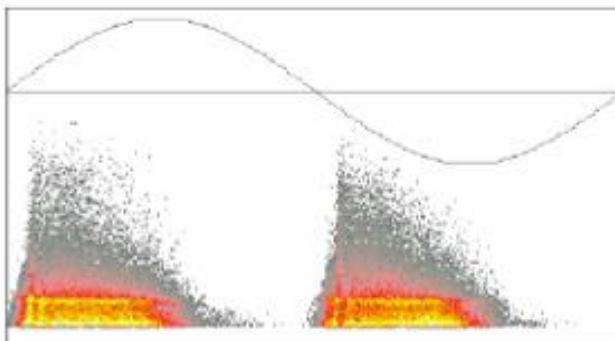


Fonte: Azuaje C.J., Torres W.J., Experiences in Identification of Partial Discharge Pattern in Large Hydrogenerators (2006)

Consequentemente, descargas parciais podem indicar a presença de vazios ou delaminação causada por sobreaquecimento ou outros defeitos tais como impregnação imperfeita, cura incompleta durante a fabricação ou inclusão de partículas externas ou contaminantes.

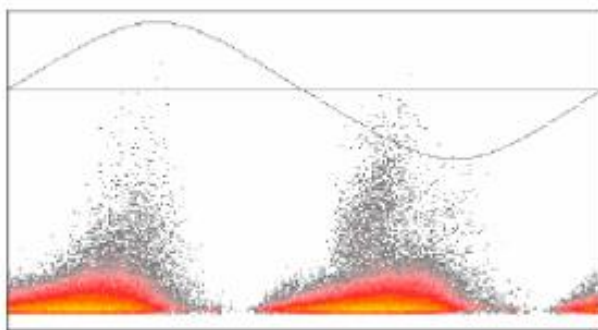
Ao longo do desenvolvimento dos sistemas de detecção de descargas parciais, os padrões para a posição das falhas foram estabelecidos. Os padrões clássicos de detecção propostos por VOGELSANG (2005) são apresentados na Figura 33 como descargas internas, na Figura 34 para descargas superficiais e na Figura 35 a superposição das descargas internas e externas.

Figura 33 – Padrão do efeito das descargas parciais para delaminação



Fonte: Vogelsang B., Fruth B., Ducry O.
Performance testing of high voltage generator-
and motor insulation systems (2005).

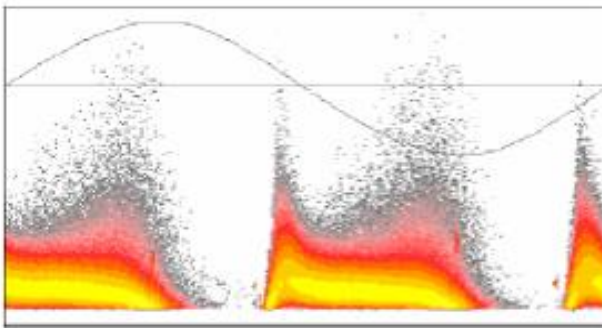
Figura 34 – Padrão do efeito das descargas parciais na superfície da cabeça de bobina



Fonte: Vogelsang B., Fruth B., Ducry O.
Performance testing of high voltage generator-
and motor insulation systems (2005).

Para o padrão das descargas internas VOGELSANG (2005) propõe um formato triangular e para as descargas superficiais é possível identificar que as descargas no semi-ciclo negativo possuem mais intensidade do que as descargas do primeiro semi-ciclo. Quando existe atividade de descargas parciais tanto na superfície quanto no interior da isolação a sobreposição dos padrões torna a interpretação mais complexa, mas ainda mantém as características de cada local das descargas.

Figura 35 – Padrão do efeito das descargas parciais internas e externas



Fonte: Vogelsang B., Fruth B., Ducry O.
Performance testing of high voltage generator-
and motor insulation systems (2005).

As descargas parciais também são classificadas por RUX (2004) não somente como um sintoma de um sistema de isolação defeituoso. A ionização do gás resultante das descargas contém elétrons reativos quimicamente, íons, moléculas excitadas, e radicais livres que podem decompor e degradar ainda mais a isolação sólida das paredes internas da cavidade. Enquanto o dano causado por uma simples descarga parcial acontece, o efeito acumulativo de muitas descargas pode eventualmente permitir falha da isolação.

3.2 – O circuito equivalente do sistema de isolação

A apresentação dos fenômenos na seção anterior tem o objetivo de gerar embasamento sobre as características físicas de um sistema de isolação, criando desta forma uma relação direta dessas características com as medidas elétricas realizadas durante as avaliações/ensaios. É importante observar que, pela complexidade das características dos

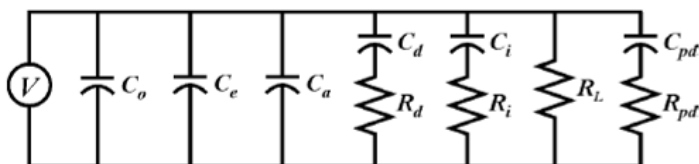
materiais envolvidos em um sistema de isolamento, muitas das oportunidades de identificação dos fenômenos são desperdiçadas pela dificuldade em relacionar a resposta do dielétrico com os fenômenos físicos/químicos envolvidos.

Um comportamento macroscópico da carga de capacitância geométrica, polarização dielétrica, condução e descargas parciais podem ser modelados, de acordo com NICOLAU (2005), usando os parâmetros de circuito acumulados através da combinação de resistores e capacitores série ou paralelos. Tais modelos são úteis para estudo de características preditivas de isolamento, e também para reconhecer anormalidade e mudanças que podem indicar deterioração ou condições adversas.

Os detalhes dos parâmetros agrupados na representação do circuito de uma típica isolamento de um enrolamento de estator bobinado são mostrados na Figura 36, levando em conta os fenômenos dielétricos o qual ocorrem durante o teste de alta tensão.

Em RUX (2004) é estabelecido que em ensaios em frequência industrial (50/60Hz), a polarização eletrônica representada C_e e a polarização atômica C_a são praticamente instantâneas e suas respectivas perdas R_e e R_a são nulas. Portanto no circuito equivalente da Figura 36 não são adicionados os resistores R_e e R_a .

Figura 36 – Circuito equivalente



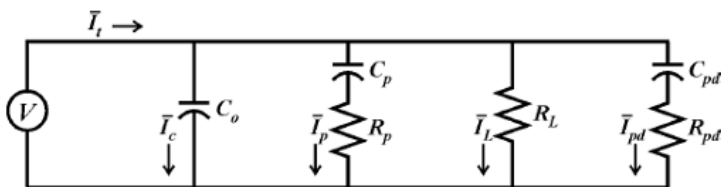
Fonte: Ruz L.M. - The Physical Phenomena Associated with Stator Winding Insulation as Detected By The Ramped Direct High Voltage Method (2004)

A polarização de dipolos é apresentada na Figura 36 usando uma combinação série do capacitor C_d e o resistor de perdas R_d . Similarmente, polarização de cargas espaciais é modelada usando o resistor de perdas R_i e o capacitor C_i . A corrente de condução da isolamento de alta qualidade é tipicamente pequena e praticamente proporcional à tensão aplicada. Um simples resistor R_L é usado para a soma do efeito das correntes de superfície e da corrente de condução através do volume

da isolação. O efeito das descargas parciais de superfície e internas podem ser representados pelo arranjo de um capacitor C_{pd} e resistor R_{pd} .

O modelo de isolação pode ser simplificado pela combinação dos quatro mecanismos individuais de polarização (eletrônica, atômica, dipolar e cargas espaciais) e correspondente a um capacitor equivalente C_p em serie com um resistor de perdas R_p , como mostrado na Figura 37.

Figura 37 – Circuito equivalente simplificado



Fonte: Ruz L.M. - The Physical Phenomena Associated with Stator Winding Insulation as Detected By The Ramped Direct High Voltage Method (2004)

Uma simplificação do modelo de isolação é um único resistor equivalente e um capacitor, conforme determinado pela IEEE 286 (2002). Embora um modelo simples seja frequentemente usado para descrever as perdas relativas observadas durante a medição do fator de dissipação, a representação detalhada é mais útil para entender e analisar os fenômenos complexos da isolação.

3.3 – Métodos de ensaio utilizados na investigação - Modo “Off-Line”

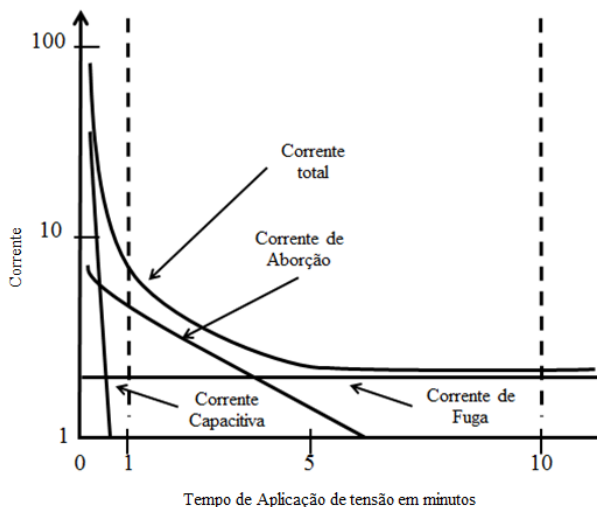
Os métodos para realização dos ensaios de resistência da isolação, índice de polarização, perdas dielétricas, capacitância, descargas parciais e resposta à rampa em tensão contínua serão apresentados a seguir com o objetivo de demonstrar o comportamento de cada falha simulada e a condição de ensaio estabelecido em norma.

3.3.1 – Ensaio de resistência da isolação

A resistência da isolação é definida como a divisão da tensão sobre a corrente resultante ($R=V/I$). Medições são feitas com um megôhmetro através da aplicação de uma tensão negativa nos eletrodos

da amostra, medindo a corrente resultante e, então, calcula-se o valor de R . A carga capacitiva e os efeitos da polarização do dielétrico e fuga causam na corrente medida o comportamento conforme a Figura 38. A corrente inicia com valores altos e sua intensidade decai ao longo do tempo.

Figura 38 – Decomposição da corrente dielétrica de uma isolação epóxi-mica.



Fonte: IEEE Std 43 - Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery (2000)

Para manter a consistência, a medição da resistência da isolação é determinada sobre um período de tempo específico, tipicamente um minuto após a tensão de teste ser aplicada. As medições de resistência da isolação são propostas pela IEEE43 (2000) e combinam tanto a resistência volumétrica quanto a de superfície. Os valores das resistências são usados principalmente para detectar absorção de umidade, contaminação condutiva, grau de cura, fissuras e trincas.

A tensão aplicada deve ser restrita a um valor apropriado à tensão nominal da máquina conforme os dados apresentados na Tabela 2. Se a tensão de teste é relativamente alta demais, pode causar uma falha. A resistência da isolação pode decair levemente com o aumento da tensão de teste. Entretanto, para uma isolação em boas condições, valores aproximados da resistência da isolação serão obtidos para qualquer nível de tensão teste, até o limite da capacidade da isolação. O guia para

execução do ensaio de resistência da isolação é dado pela IEEE 43 (2000). Para estatores com tensão nominal de 13,8kV a norma recomenda nível de tensão de teste de 5.000Vcc e 10.000Vcc.

Tabela 2 – Índice de polarização mínimo – IEEE43

Tensão Nominal do Enrolamento (V)	Tensão CC de teste da resistência da isolação (V)
< 1000	500
1000 - 2500	500-1000
2501 - 5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
>12000	5000-10000

Fonte: IEEE Std 43 - Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery (2000)

A vida útil do isolamento é afetada pelas condições ambientais de trabalho/operação, conforme mostrado na Tabela 3.

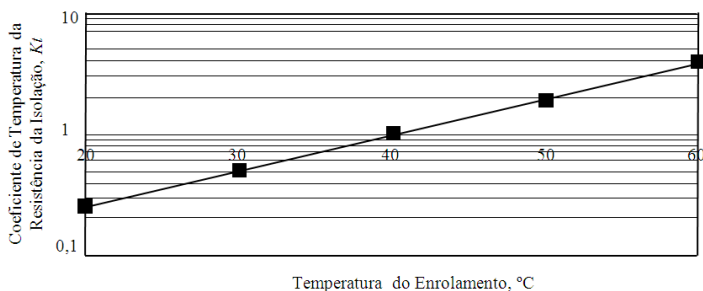
Tabela 3 – Classe de temperatura do sistema de isolação

Classe de sistema de isolação	Temperatura limite de operação em graus Celsius	Temperatura do limite térmico do material em graus Celsius
O	90	
A	105	150
B	130	175
F	155	200
H	180	225
C	220	

Fonte: IEEE Std 43 - Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery (2000)

As principais causas da diminuição da vida da isolação são em virtude da umidade relativa e de contaminantes no meio ambiente. De acordo com a IEEE43 (2000), a avaliação da resistência de isolamento do dielétrico deve ser feita após a máquina atingir seu regime de temperatura em condições normais de operação, e convertida para uma base de temperatura de 40°C. Em geral, o fator de correção K_T da temperatura da medição da resistência da isolação é discretizado de 10°C em 10°C, o que pode tornar a conversão pouco precisa. O valor de K_T pode ser aproximado pela equação (63) e/ou conforme apresentado na curva da Figura 39.

Figura 39 – Coeficiente de temperatura da isolação - K_T



Fonte: IEEE Std 43 - Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery (2000)

$$K_T = (0,5)^{\frac{(40-T)}{10}} \quad (63)$$

O coeficiente K_T utilizado na correção da resistência da isolação considera a temperatura (em °C) do enrolamento T durante a medição. O valor de resistência da isolação corrigido para a base de temperatura normalizada, conforme equação (63), pode ser utilizada para comparação da referência de limite recomendado pela IEEE 43 (2000), e considera a mínima resistência da isolação aceitável (em Megaohms), conforme apresentado na Tabela 4.

O efeito do aumento da temperatura material dielétrico é caracterizado por RUX (2004) com o aumento da condutividade do material. Como resultado, mudanças na temperatura das amostras podem afetar significativamente as medições da resistência da isolação. Para minimizar os efeitos das variações da temperatura e permitir uma comparação mais significativa dos valores de resistência as medições foram realizadas em ambiente controlado sem necessidade de correção, ficando a conversão de temperatura mais útil para medições de enrolamentos completos.

$$R_C = K_T R_T \quad (64)$$

Tabela 4 – Valor mínimo da resistência da isolamento pela IEEE43

Mínima resistência da isolação IR1min	Abrangência
$IR1min = kV + 1$	Para a maioria dos enrolamentos fabricados nos anos de 1970, enrolamentos de campo, e demais não descritos abaixo
$IR1min = 100$	Para a maioria das armaduras CC e enrolamentos AC fabricado após os anos de 1970 (bobinas pré-formadas)
$IR1min = 5$	Para a maioria dos estatores com enrolamento randômico e enrolamentos com bobinas pré-formada com tensão nominal menor que 1kV

Fonte: IEEE Std 43 - Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery (2000)

A umidade atmosférica e a contaminação da superfície também podem influenciar a resistência da isolamento e podem afetar a precisão da avaliação.

3.3.2 – Ensaio de índice de polarização

O teste de índice de polarização é realizado com um megôhmetro e possui o mesmo nível de tensão do ensaio de resistência da isolamento, porém possui registros de medição à 1 minuto (definido como R_1) e a 10 minutos (definido como R_{10}). A relação entre as duas medições (R_{10}/R_1) é a definição do índice de polarização, o qual fornece uma indicação da contaminação, cura e integridade física da isolamento. Quando a tensão contínua é aplicada no enrolamento do estator bobinado, a corrente do dielétrico aumenta rapidamente e, então, gradualmente vai reduzindo e se aproxima de um valor constante. Desta forma o valor medido da resistência da isolamento de um enrolamento limpo e seco apresenta um comportamento inverso ao da corrente. O valor medido da resistência da isolamento apresenta um aumento progressivo e pode continuar aumentando por várias horas após ser energizado. Nos casos onde a isolamento está muito suja ou úmida, a componente corrente de fuga apresenta valor elevado fazendo com que a resistência não apresente a característica da curva de polarização. Em função da resposta da resistência da isolamento ser diretamente afetada pela corrente de polarização e condução, o declive da curva de polarização é usado como indicador. Uma vez que o índice de polarização é a razão de duas

medições realizadas sob condições idênticas, ela é menos sensível a variações da temperatura do que resistência da isolação a 1 minuto.

Por recomendação da IEEE 43-2000, o índice de polarização deve ser maior ou igual a 2 para uma isolação classe F, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Valor mínimo do índice de polarização pela IEEE43

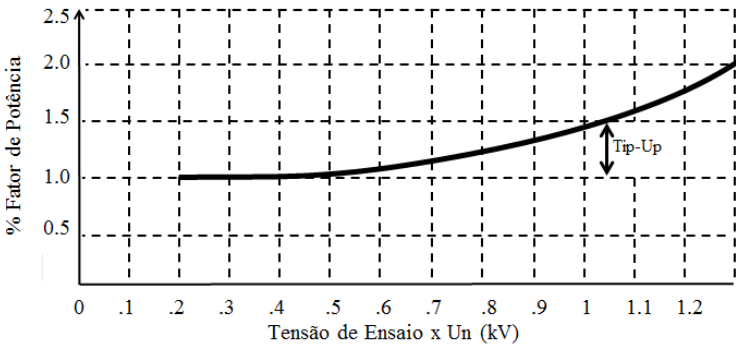
Classe térmica	Índice de Polarização mínimo
Classe A	1,5
Classe B	2,0
Classe F	2,0
Classe H	2,0

Fonte: IEEE Std 43 - Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery (2000)

3.3.3 – Ensaio de perdas dielétricas e capacitância

As perdas dielétricas ou fator de dissipação foram medidas através de uma ponte OMICRON (MPD 600) e representam a perda total sobre o dielétrico e é o resultado de uma rede de vários fenômenos ocorrendo na isolação. Como apresentado pela IEEE286 (2000) e mostrado na Figura 40, é esperado um aumento relativo das perdas dielétricas devido à polarização dielétrica e/ou à condução.

Figura 40 – Tangente de delta – IEEE 286



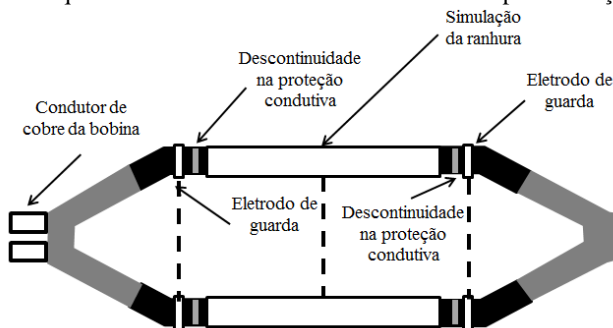
Fonte: IEEE Std 286 - Recommended Practic for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation (2000)

As descargas parciais na superfície da bobina, nos vazios dentro do dielétrico também resultam em um aumento do fator de dissipação. A

avaliação das perdas dielétricas é realizada através do primeiro degrau de ensaio de tensão, através do $\Delta \tan \delta$, do Tip-Up e demonstram a qualidade e a condição da isolamento.

O ensaio de bobinas individuais de um estator é tipicamente conduzido em fábrica como condição de aceitação, embora o ensaio possa ser usado como teste de manutenção em enrolamento completos para avaliar mudanças na condição da isolamento ao longo do tempo. As medições em fábrica geralmente envolvem eletrodos de guarda na cabeça de bobina, onde apenas a parte reta (ranhura do núcleo) da bobina é testada. Para realizar a medição da região da bobina que tem contato com o núcleo, o circuito de guarda do equipamento de medição de perdas dielétricas é conectado aos eletrodos de guarda da bobina, conforme mostrado na Figura 41. Como medida de garantia de medição da parte reta da bobina é comum realizar uma pequena descontinuidade na proteção condutiva e desta maneira limitar a região de avaliação das perdas dielétricas. A Figura 41 mostra também os eletrodos para simulação da ranhura do núcleo ferromagnético, e são através deles que a corrente do dielétrico é medida.

Figura 41 – Esquema de ensaio com eletrodos limitadores para medição



Fonte: IEEE Std 286 - Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation (2000)

Durante o desenvolvimento de um sistema de isolamento o método de avaliação do dielétrico através de amostras e com limitação da região da ranhura é preferível em relação às medições do estator completo. A geometria retangular da região da bobina que é inserida na ranhura do núcleo permite que a isolamento seja compactada durante a etapa de produção. A região da cabeça de bobina não possui esta característica por ter uma geometria mais irregular e menor uniformidade de

compactação das espiras. Como resultado, o elevado nível de perdas na cabeça de bobina pode mascarar o resultado da região da ranhura. Como o estator bobinado completo possui várias bobinas sem guarda de cabeça de bobina, é impossível comparar diretamente resultados de máquinas elétricas diferentes seja o ensaio realizado em fábrica ou no campo. A comparação entre máquinas similares e a tendência das medições ao longo do tempo disponibiliza a melhor maneira para avaliação da condição da isolamento. As medições das perdas dielétricas nas amostras foram realizadas variando a tensão de teste de 20 a 120% da tensão nominal.

3.3.4 – Ensaio de perdas dielétricas com frequência de ensaio variável

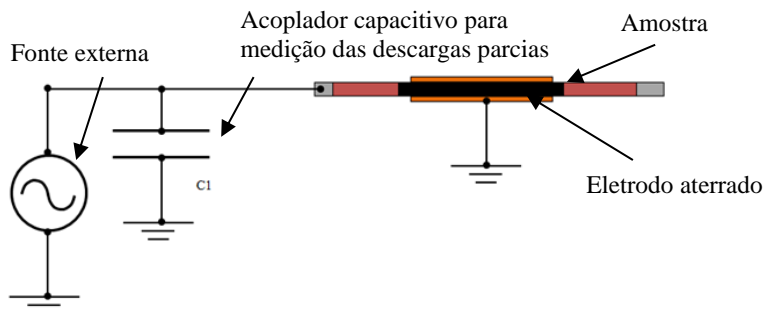
Conforme mostrado na seção anterior, a curva de dispersão da Figura 25 apresenta o efeito dos mecanismos de polarização sobre a permissividade elétrica relativa do dielétrico e o fator de perdas. O principal objetivo da medição das perdas dielétricas com mudança de frequência é buscar a contribuição de cada um dos mecanismos de polarização e caracterizar as amostras fabricadas com as simulações de defeitos. A medição das perdas dielétricas em baixas frequências foi realizada com equipamento DIRANA (OMICRON) e através deste método permite-se que os mecanismos de polarização tenham o ciclo completo antes da inversão do sentido do campo elétrico.

3.3.5 – Ensaio de descargas parciais

RUX (2004) diz que as descargas parciais nos enrolamentos de estatores bobinados são manifestadas por pulsos de corrente positivas e negativas de poucos nanosegundos de duração, sobrepostos à corrente da máquina. Uma descarga parcial simples é equivalente a uma injeção de um rápido pulso de corrente e de tensão no ponto do enrolamento do estator onde ela ocorre. O pulso de descarga parcial viaja em direções opostas, uma na direção dos terminais da fase e outra na direção do neutro. O pulso de descarga parcial irá propagar através do enrolamento como uma linha de transmissão, como uma série de indutâncias e capacitâncias para terra, dependendo da configuração do enrolamento. Como a onda se propaga em direção dos terminais do enrolamento, ela é atenuada e o tempo da frente de onda do pulso da descarga parcial se torna maior.

A IEEE Std. 1434-2000, “Trial Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machines”, descreve um sistema típico para condução das medidas das descargas parciais “Off-Line” em amostras individuais conforme arranjo da Figura 42.

Figura 42 – Arranjo de para medição de descargas parciais de uma amostra



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A medição apresentada neste trabalho foi obtida usando o método de energização das amostras através da utilização de uma fonte de tensão externa AC. As descargas parciais foram medidas usando um capacitor de epóxi-mica de 1,1nF, conforme sugerido pelo fabricante do equipamento de medição empregado (MPD600-Omicron).

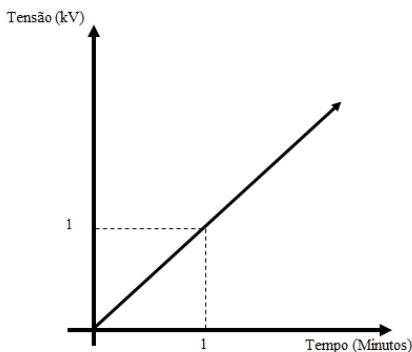
3.3.6 – Ensaio de rampa em tensão contínua

A resposta de tensão e corrente observadas durante a rampa de tensão contínua apresentada pela IEEE 95 (2002), conforme mostrado na Figura 45, tem sido usada para avaliar a condição da isolamento, e para determinar quando e qual ação corretiva é necessária.

A corrente medida é plotada através de um megômetro e usada para avaliar a condição da isolamento por desvios notáveis de um formato normal da curva de teste. Qualquer deformação da curva padrão pode ser uma indicação de falta de isolamento.

Em função da magnitude da tensão ser continuamente aumentada através do período de teste, a carga capacitiva e os efeitos da polarização dielétrica são mais fáceis de serem notados do que aqueles observados durante os ensaios de tensão alternada de baixa frequência.

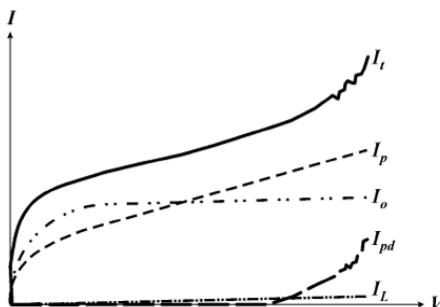
Figura 43 – Exemplo da rampa de tensão CC recomendada pela IEEE 95.



Fonte: IEEE 95-2002 IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage (2002)

A decomposição da resposta típica a um teste de rampa de tensão contínua é mostrada na Figura 44. Conforme RUX (2004), a corrente observada I_t é composta pela soma das correntes relativas à capacitância geométrica de carga I_o , à polarização dielétrica I_p , à corrente de fuga I_L e à componente de descargas parciais I_{pd} .

Figura 44 – Curva de resposta da isolamento a uma tensão aplicada CC



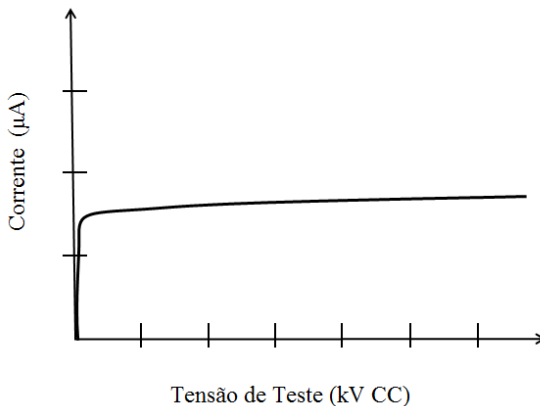
Fonte: Ruz L.M. - The Physical Phenomena Associated with Stator Winding Insulation as Detected By The Ramped Direct High Voltage Method (2004)

A corrente da capacitância geométrica I_o tende a estabilizar logo após certo valor de tensão (comumente, isto ocorre no primeiro quarto

do intervalo de ensaio). A corrente de polarização I_p irá apresentar uma taxa de crescimento constante ao longo do ensaio. A corrente de fuga I_L tem magnitude baixa para bons dielétricos e apresenta leve incremento ao longo do ensaio em virtude do aumento da tensão. A componente I_{pd} terá um comportamento não linear em tensões mais altas, demonstrando aumento da corrente no momento em que as descargas acontecem nas cavidades. Durante o ensaio de rampa em tensão contínua, a corrente total I_t é medida e plotada contra a tensão aplicada. A instrumentação de medição disponível no mercado não processa o sinal para separar a corrente total em componentes de corrente individuais. Portanto, é necessário que uma avaliação cuidadosa e especializada do comportamento da curva seja realizada para diagnosticar corretamente as características (condições ou tipo de defeito) do dielétrico.

A curva típica de uma isolamento epóxi-mica de alta qualidade quando testada com a rampa de tensão é apresentada pela IEEE 95 (2002) e mostrada na Figura 45.

Figura 45 – Resposta típica ao ensaio de rampa de tensão para um isolamento epóxi-mica



Fonte: IEEE-STD-95 (IEEE recommended practice for insulation testing of AC electric machinery (2300 V and above) with high direct voltage) (2002)

No caso da isolamento em boas condições, RUX (2004) afirma que a carga da capacitância geométrica e que a corrente de polarização constituem a maior parte da corrente medida. De maneira geral, a

suavização e linearidade da curva é uma característica da isolação de um estator bobinado em boas condições.

3.4 – Considerações finais do capítulo

Este capítulo tratou dos mecanismos de perdas dielétricas, perdas por polarização e o fenômeno das descargas parciais de um sistema de isolação. Todos são inerentes às características e à qualidade dos materiais utilizados durante o desenvolvimento de um sistema de isolação para alta tensão, e também são diretamente relacionados com a capacidade do processo industrial de fabricação. Os fenômenos físicos envolvidos no sistema de isolação foram apresentados através do circuito equivalente utilizando componentes passivos (resistores e capacitores) com o objetivo de demonstrar eletricamente o comportamento de cada um dos mecanismos de falha.

4 – ENSAIOS REALIZADOS NAS AMOSTRAS DE UM SISTEMA DE ISOLAÇÃO 13,8kV

Os métodos não destrutivos comumente utilizados foram aplicados sobre amostras previamente selecionadas e manufaturadas, com ou sem falhas, com o objetivo de diagnosticá-las. Este capítulo apresenta os experimentos realizados sobre as barras fabricadas com as típicas falhas de isolação. As falhas escolhidas para o estudo são geradas no processo industrial ou por degradação do sistema de isolação ao longo da vida útil da máquina elétrica.

4.1 – Fabricação de amostras de um sistema de isolação para alta tensão

Defeitos específicos foram escolhidos para representar problemas tipicamente encontrados durante o processo de fabricação de um sistema de isolação para máquinas de alta tensão de 13,8kV_{CA}. As falhas de isolação incorporadas à fabricação das amostras são mostradas na Tabela 6 e incluíram amostras padrão para referência, amostra com contaminação interna, com baixa tração de enfitamento da isolação principal para simulação de vazios, dano à fita de controle de descargas parciais e cura inadequada. Para cada tipo estudado, foram construídas quatro amostras.

Tabela 6 – Amostras para sistema de isolação – 13,8kV_{CA}

Número da Amostra	Tipo de Isolação	Característica
1	Mica –Epóxi – Classe F	Processo normal
2		
3		
4		
5	Mica –Epóxi – Classe F	Cura incompleta
6		
7		
8		
9	Mica –Epóxi – Classe F	Dano na fita de proteção contra descargas parciais para simulação de vazios na superfície
10		
11		
12		

Número da Amostra	Tipo de Isolação	Característica
13	Mica –Epóxi – Classe F	Contaminante interno
14		
15		
16		
17	Mica –Epóxi – Classe F	Baixa tração durante enfitamento para simulação de vazios internos
18		
19		
20		

Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2015)

Na Figura 46 são apresentados os sete passos de fabricação das amostras. No passo 1, tem-se apenas barra nua de alumínio. No passo 2, foram aplicadas 10 camadas de mica com 48% de sobreposição e espessura de 0,15mm.

Figura 46 – Vista principal do processo de enfitamento das amostras



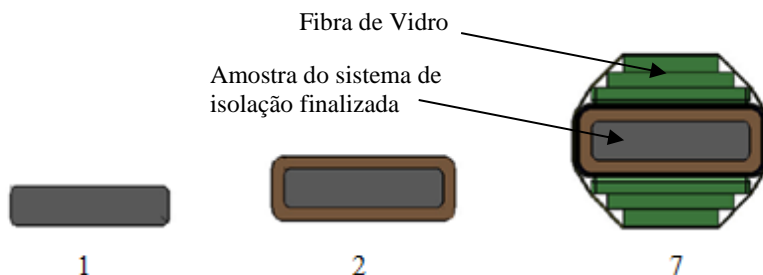
Fonte: desenvolvido pelo autor

No passo 3, foi aplicada a fita à base de carbono para controle de descargas parciais entre a isolamento e o núcleo. No passo 4, foi utilizada a fita à base de carbetto de silício para controle do campo elétrico na saída

do núcleo ferromagnético. No passo 5, foi aplicada a fita para controle de corona. No passo 6, foi aplicado calços de fibra de vidro para garantir a sobreposição da fita de carbono e carbetto de silício. Após preparação do sistema de isolamento, todas as amostras receberam no passo 7 calhas em fibra de vidro para simular a ranhura do núcleo, exceto as barras para simulação dos vazios. Para garantir que as barras para simulação de vazios tivessem maior chance de apresentar cavidades internas (vazios), as calhas para simulação da ranhura do núcleo não foram utilizadas, desta maneira reduzindo a compactação da isolamento e permitindo que as cavidades internas tivessem maior probabilidade de não serem preenchidas pela resina epóxi do processo VPI.

A Figura 47 apresenta a seção transversal das amostras: no passo 1, a barra de alumínio nua; no passo 2, a barra com mica; e no passo 7, a amostra pronta com os calços de fibra e fitas para controle de campo elétrico e descargas parciais.

Figura 47 – Seção transversal do sistema de isolamento



Fonte: desenvolvido pelo autor

Foi necessário garantir que os defeitos artificiais não fossem tão severos ao ponto de impedir que a isolamento principal suportasse a série de ensaios de alta tensão. Consequentemente, os defeitos de isolamento fabricados para esta investigação não são defeitos sérios a um curto espaço de tempo, isto é, provavelmente, se fossem utilizados em uma máquina, eles provocariam uma falha. A Figura 48 apresenta uma foto de algumas amostras fabricadas para o estudo.

A avaliação executada nas amostras inclui a medição da resistência da isolamento, índice de polarização, perdas dielétricas, descargas parciais e ensaio em rampa CC. Para cada ensaio realizado será apresentado o método, critérios, as suas particularidades e, no fim

de cada item, os resultados encontrados e a interpretação realizada durante o diagnóstico.

Figura 48 – Amostras prontas para serem submetidas ao VPI



Fonte: desenvolvido pelo autor

Na comparação entre as amostras, utiliza-se apenas uma amostra de cada tipo. Isto é, escolheu-se das quatro apenas uma, a que melhor representou o defeito. Isto também vale para a amostra padrão, pois algumas das amostras padrão apresentaram algum tipo de falha. Isto se deve a dificuldade em controlar a inserção de um defeito apenas, sem que outros possam a vir a ocorrer. Deste modo, os resultados são avaliados para cinco amostras, uma padrão (ideal) e outras quatro com defeito.

4.2 – Ensaios de avaliação realizados pelo método “*Off Line*”

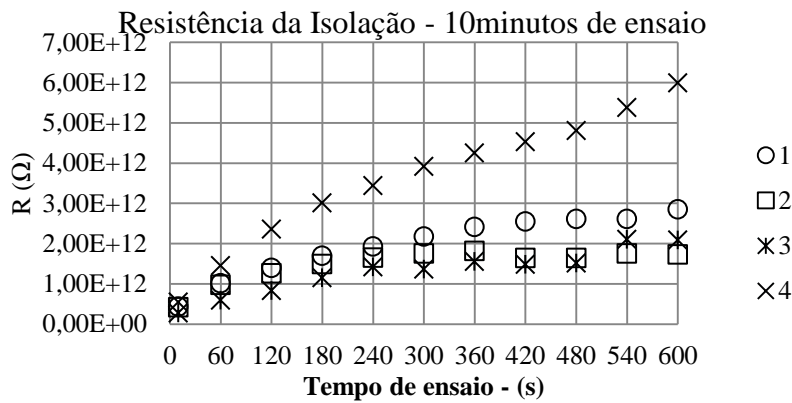
A seguir é possível identificar que a relação entre as falhas criadas nas amostras, os fenômenos físicos do dielétrico e a capacidade de detecção do método de ensaio possuem algumas particularidades que serão explicadas ao longo do capítulo.

Para condução do ensaio, as amostras foram colocadas em uma bancada de laboratório e um par de eletrodos de cobre retangular foi cuidadosamente instalado em cada parte reta da bobina. O comprimento e altura dos eletrodos foram ajustados para atender às dimensões da ranhura do núcleo. Os eletrodos foram conectados entre si e então a tensão de teste foi aplicada no condutor da bobina e nos eletrodos. A corrente entre o condutor e os eletrodos foi medida.

4.2.1 – Resultado do ensaio de resistência da isolação

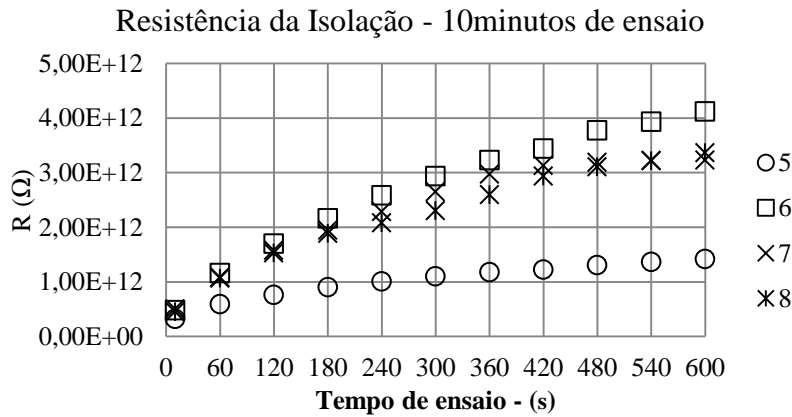
Este item apresenta os gráficos do resultado do ensaio de medição da resistência da isolação para todas as amostras, sob uma tensão de ensaio de 15KV_{CC} com monitoramento do ensaio por 10 minutos.

Figura 49 – Resultado do ensaio de resistência da isolação para as amostras com processo normal de fabricação – amostras 1 a 4



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 50 – Resultado do ensaio de resistência da isolação para as amostras com cura incompleta – amostras 5 a 8



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 51 – Resultado do ensaio de resistência da isolação para as amostras com dano na fita de proteção contra descargas parciais para simulação de vazios na superfície– amostras 9 a 12

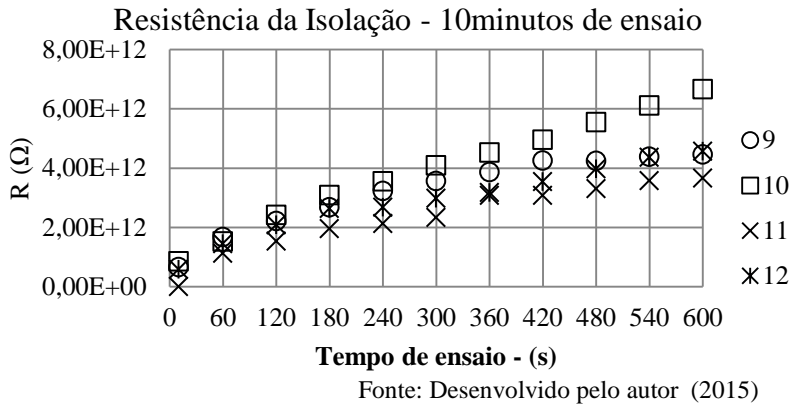


Figura 52 – Resultado do ensaio de resistência da isolação para as amostras com contaminante interno– amostras 13 a 16

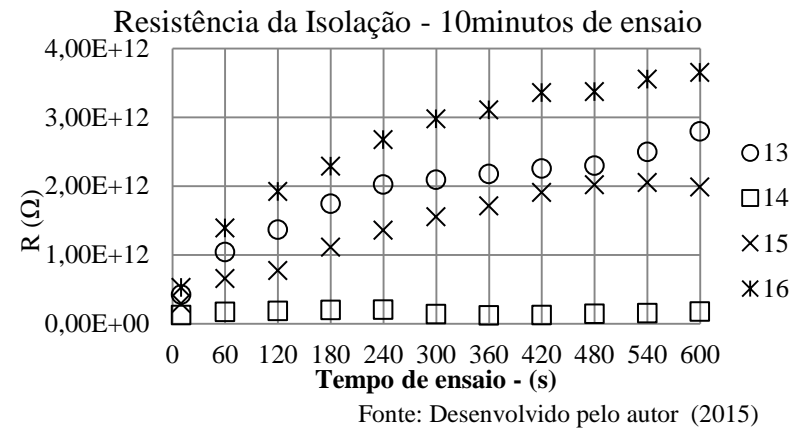
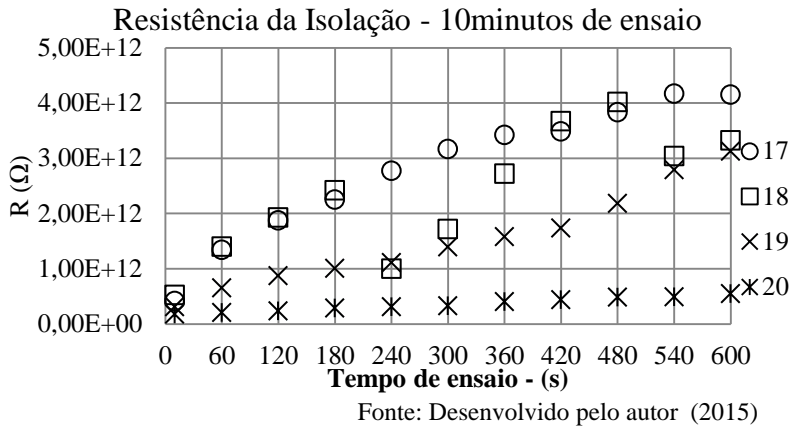


Figura 53 – Resultado do ensaio de resistência da isolação para as amostras com baixa tração durante enfitamento para simulação de vazios internos – amostras 17 a 20



4.2.2 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas

As perdas dielétricas de todas as amostras foram determinadas em 6 degraus de tensão e são apresentadas e agrupadas pelo modo de falha.

Figura 54 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas para as amostras com processo normal de fabricação – amostras 1 a 4

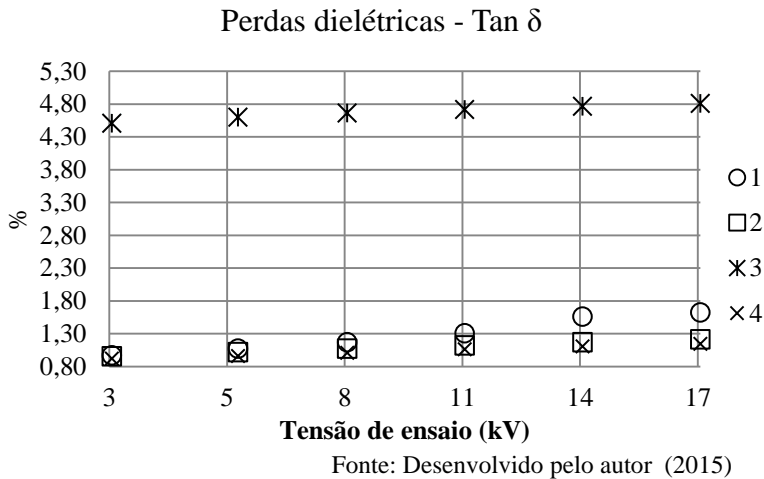


Figura 55 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas para as amostras com cura incompleta – amostras 5 a 8

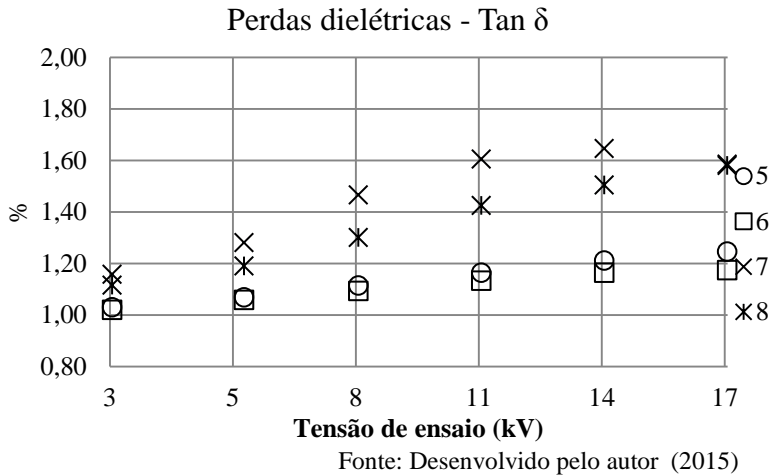


Figura 56 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas para as amostras com dano na fita de proteção contra descargas parciais para simulação de vazios na superfície– amostras 9 a 12

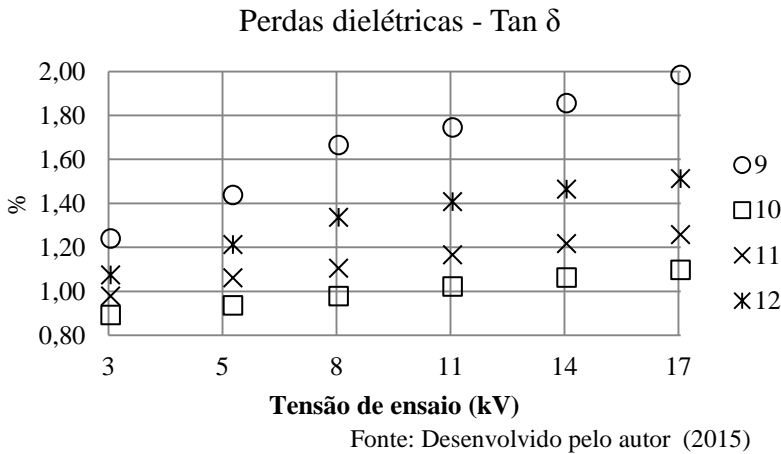


Figura 57 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas para as amostras com contaminante interno– amostras 13 a 16

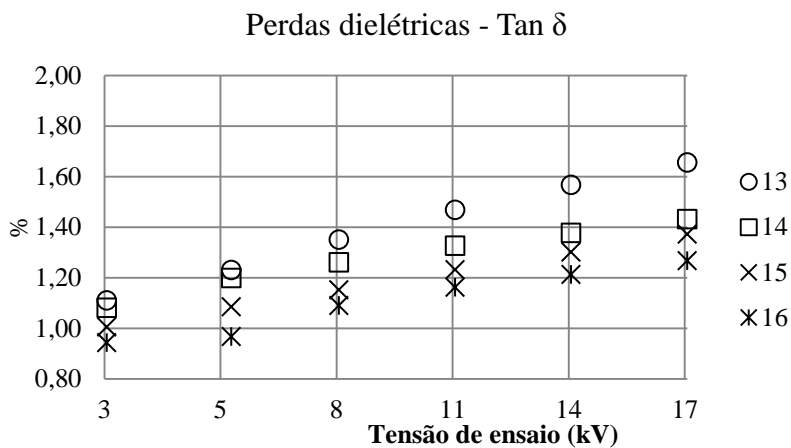
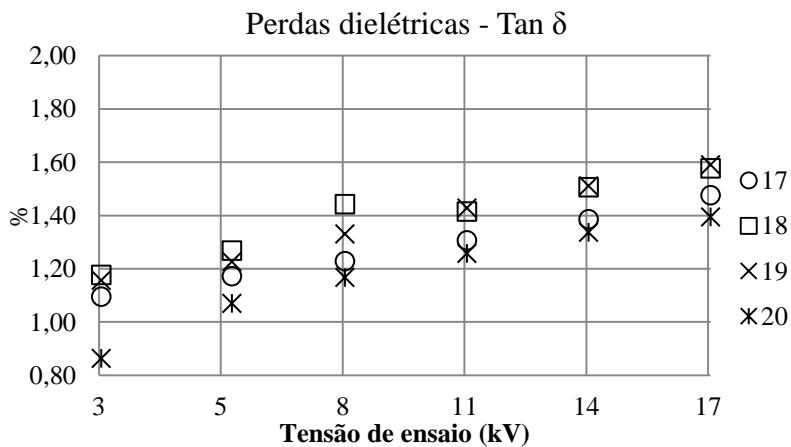


Figura 58 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas para as amostras com baixa tração durante enfitamento para simulação de vazios internos – amostras 17 a 20



4.2.3 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas com variação da frequência da tensão de ensaio

As perdas dielétricas de todas as amostras foram medidas sob um intervalo de frequência de 1mHz até 5KHz e os resultados são apresentados nos gráficos a seguir bem como a comparação entre a amostra padrão e as amostras de cada tipo de falha simulada.

Figura 59 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio – amostras 1 a 4

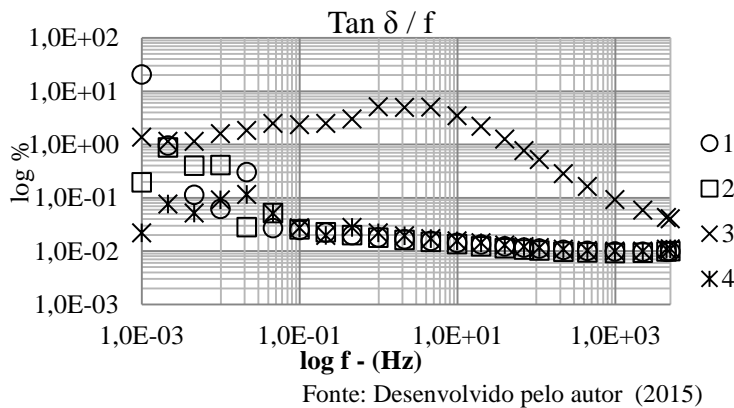


Figura 60 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio – amostras 5 a 8

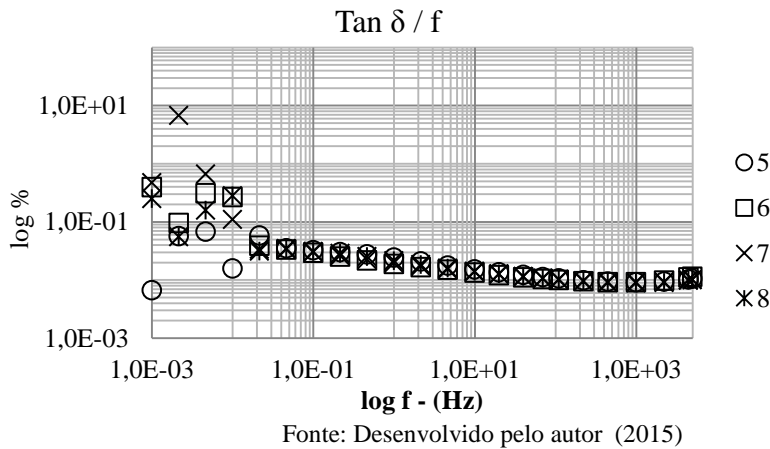
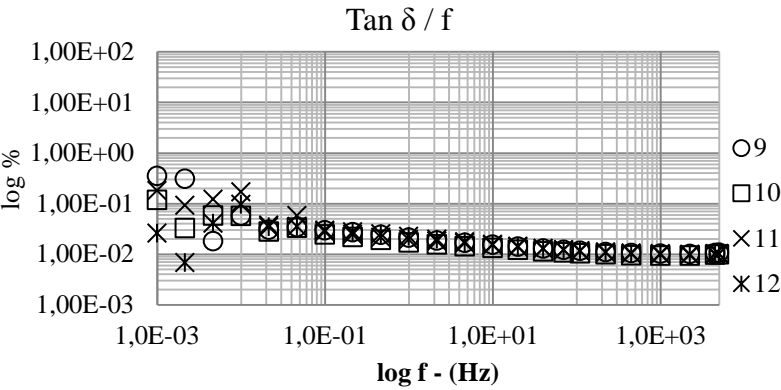
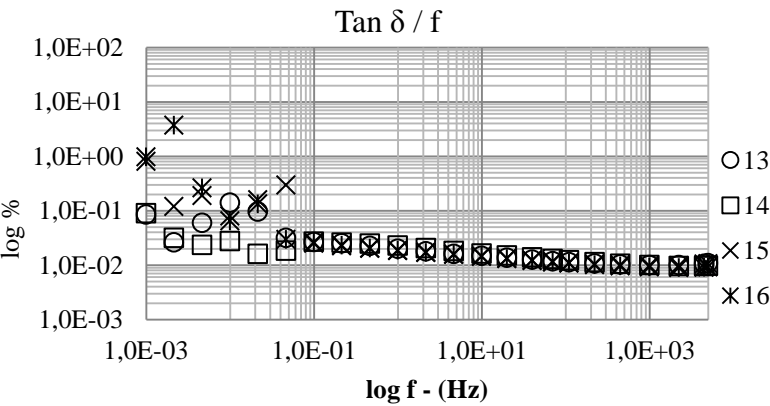


Figura 61 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio – amostras 9 a 12



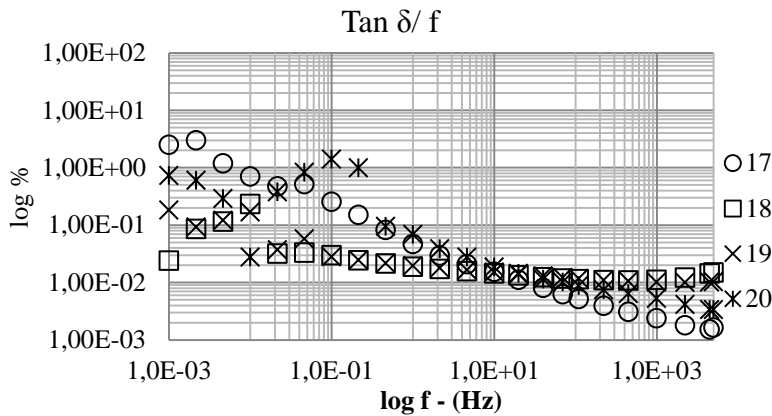
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 62 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio – amostras 13 a 16



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 63 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio – amostras 17 a 20

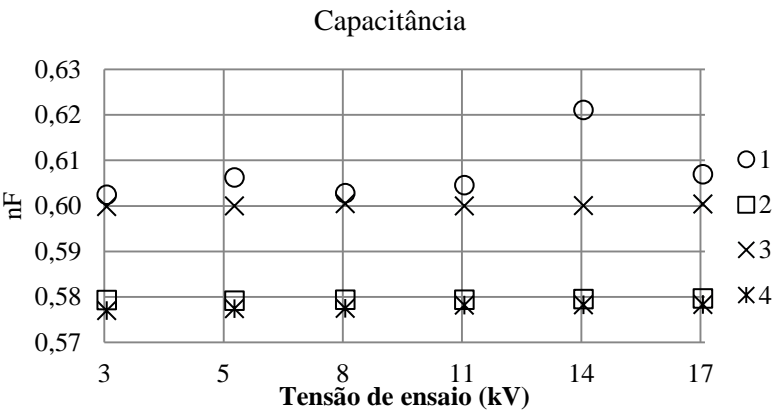


Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

4.2.4 – Resultado do ensaio de capacitância

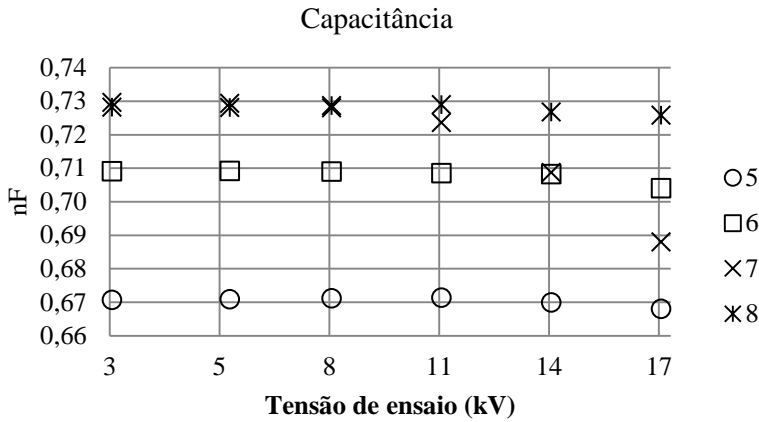
A medição do valor da capacitância de cada amostra segue os mesmos degraus do ensaio de perdas dielétricas e o gráfico para comparação dos resultados é apresentado nas figuras a seguir.

Figura 64 – Resultado do ensaio de capacitância para as amostras com processo normal de fabricação – amostras 1 a 4



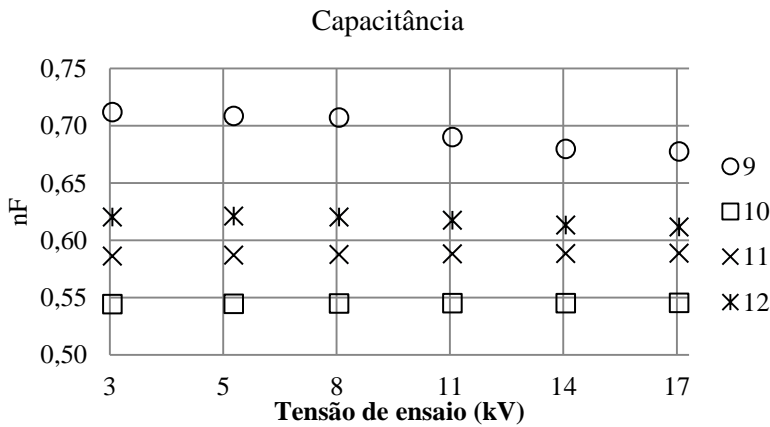
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 65 – Resultado do ensaio de capacitância para as amostras com cura incompleta – amostras 5 a 8



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 66 – Resultado do ensaio de capacitância para as amostras com dano na fita de proteção contra descargas parciais para simulação de vazios na superfície– amostras 9 a 12



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 67 – Resultado do ensaio de capacitância para as amostras com contaminante interno– amostras 13 a 16

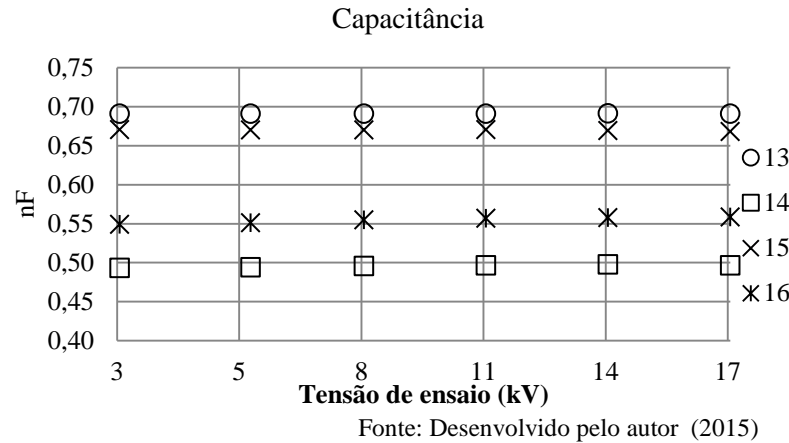
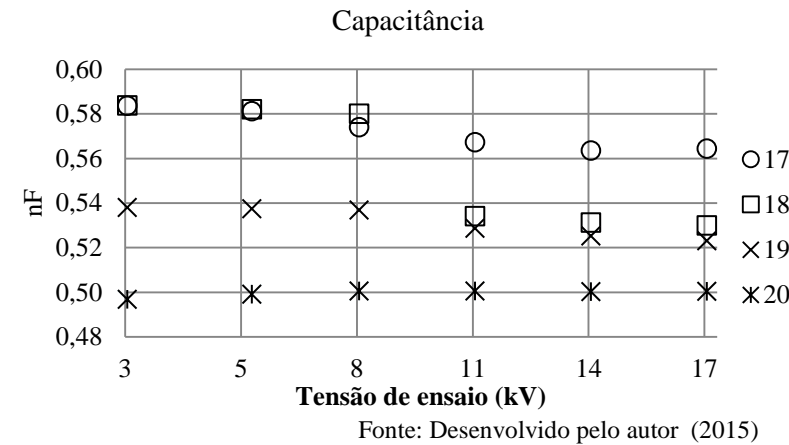


Figura 68 – Resultado do ensaio de capacitância para as amostras com baixa tração durante enfitamento para simulação de vazios internos – amostras 17 a 20

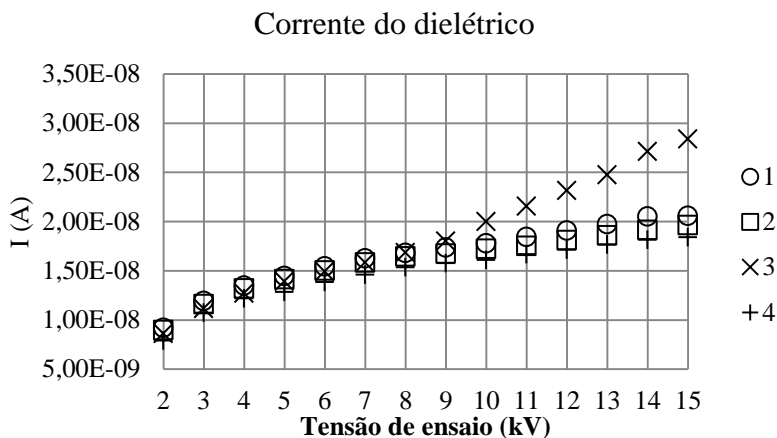


4.2.5 – Resultado do ensaio de tensão sob rampa em tensão contínua

O ensaio em rampa em tensão contínua foi realizado com taxa de 1kV/s até 15kV_{CC}. A tensão de finalização do ensaio foi determinada em

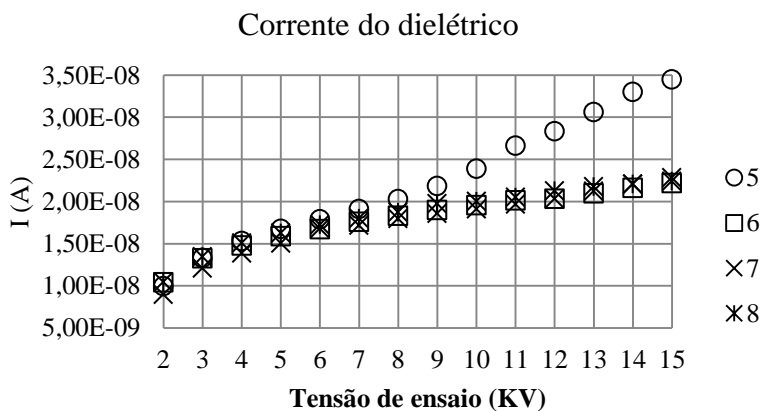
função da limitação do equipamento utilizado. Os gráficos comparativos são apresentados a seguir.

Figura 69 – Resultado do ensaio de rampa em tensão contínua para as amostras com processo normal de fabricação – amostras 1 a 4



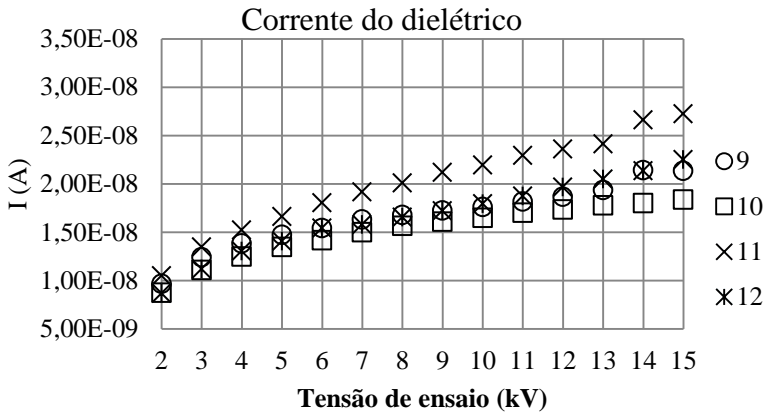
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 70 – Resultado do ensaio de rampa em tensão contínua para as amostras com cura incompleta – amostras 5 a 8



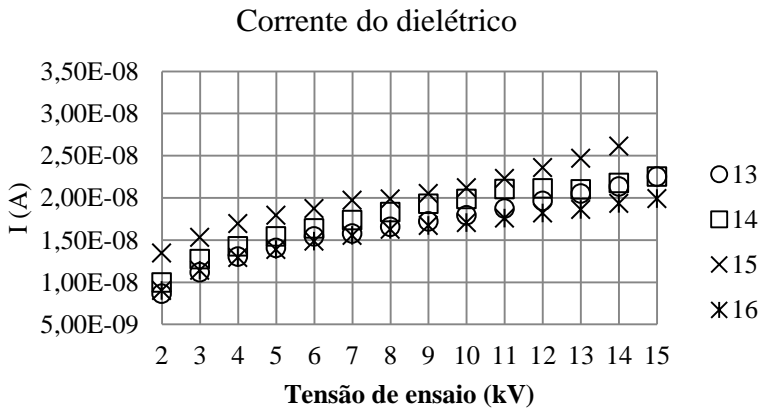
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 71 – Resultado do ensaio de rampa em tensão contínua para as amostras com dano na fita de proteção contra descargas parciais para simulação de vazios na superfície– amostras 9 a 12



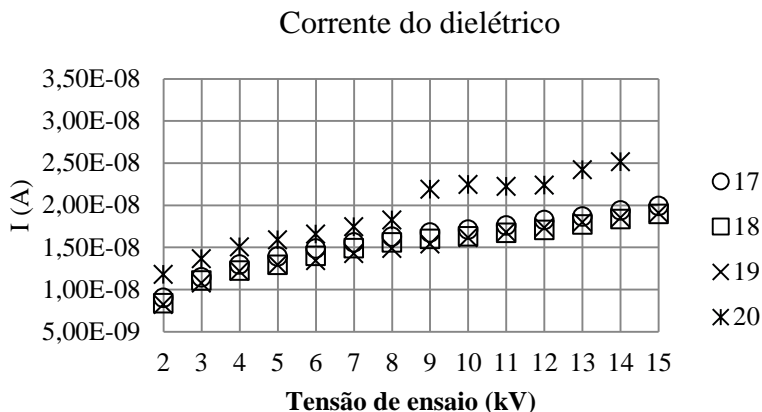
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 72 – Resultado do ensaio de rampa em tensão contínua para as amostras com contaminante interno– amostras 13 a 16



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 73 – Resultado do ensaio de rampa em tensão contínua para as amostras com baixa tração durante enfitamento para simulação de vazios internos – amostras 17 a 20

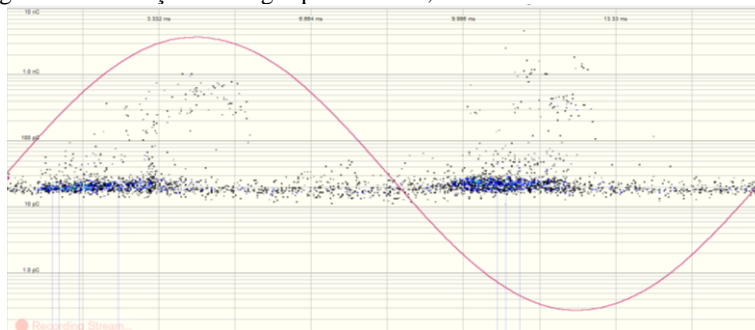


Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

4.2.6 – Resultado do ensaio de descargas parciais

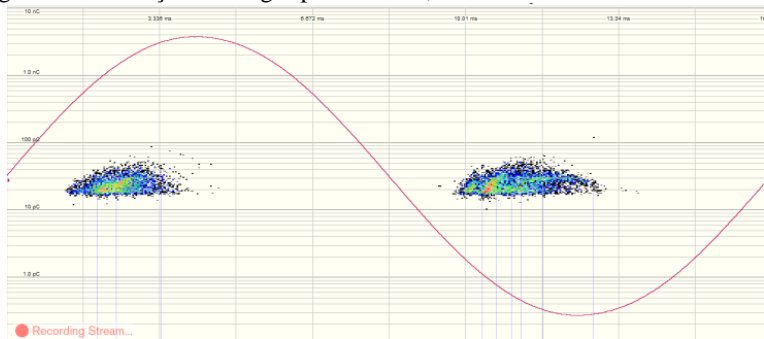
A medição das descargas parciais de cada uma das amostras foi realizada respeitando os degraus de tensão apresentado nos ensaios perdas dielétricas, mas apenas a avaliação sob 13,8kV será apresentada, pois neste patamar de tensão o padrão da descarga fica mais evidente.

Figura 74 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 1



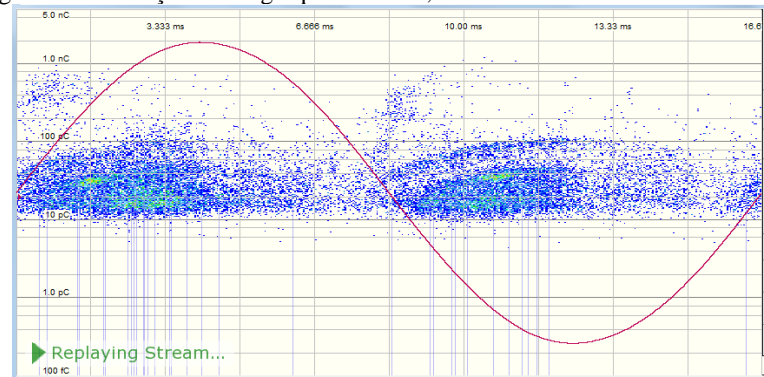
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 75 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 2



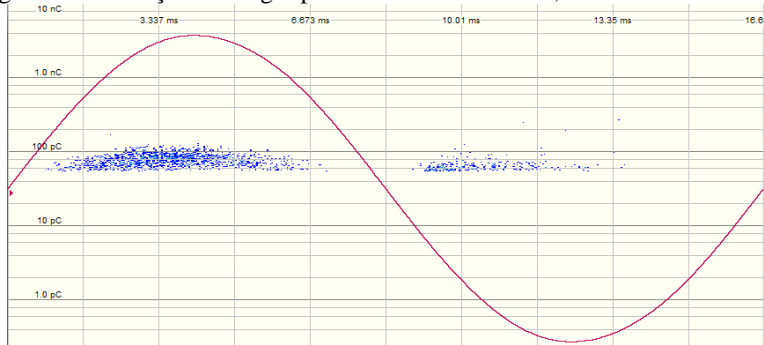
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 76 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 3



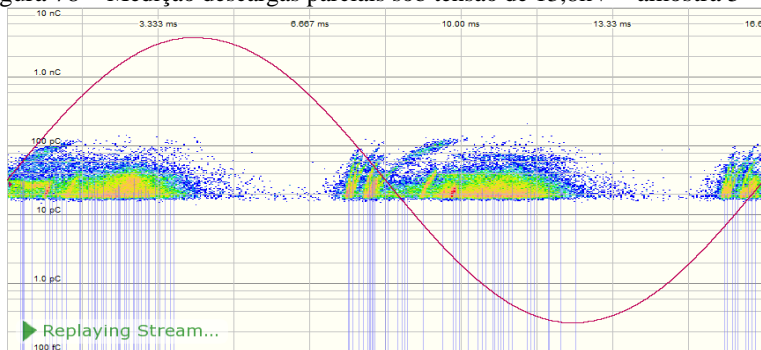
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 77 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV – amostra 4



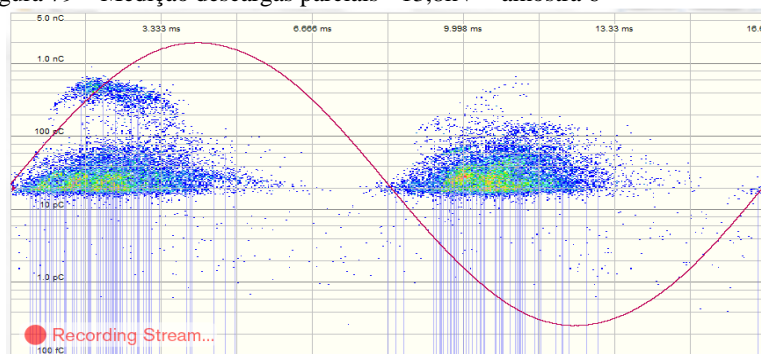
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 78 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV – amostra 5



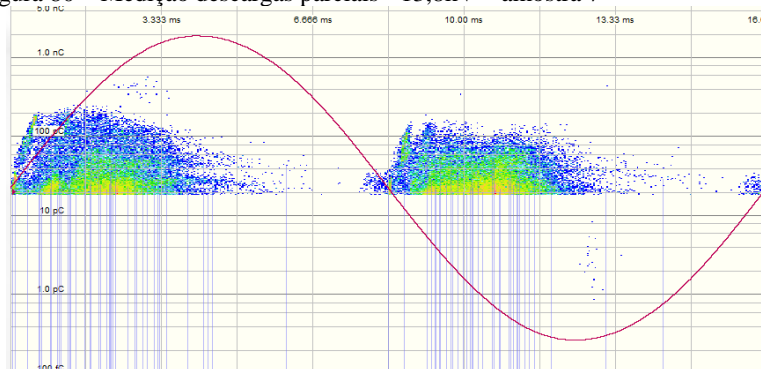
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 79 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 6



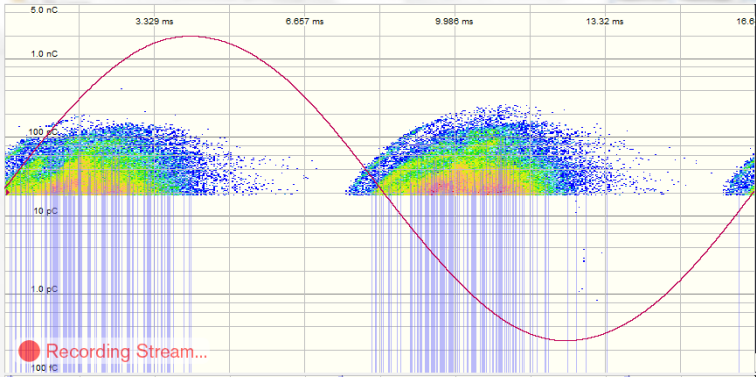
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 80 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 7



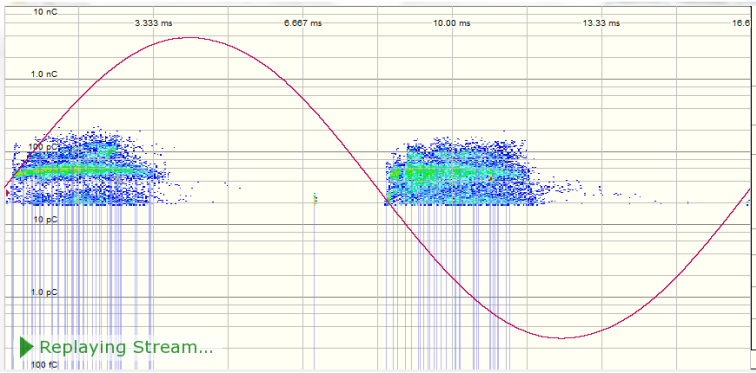
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 81 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 8



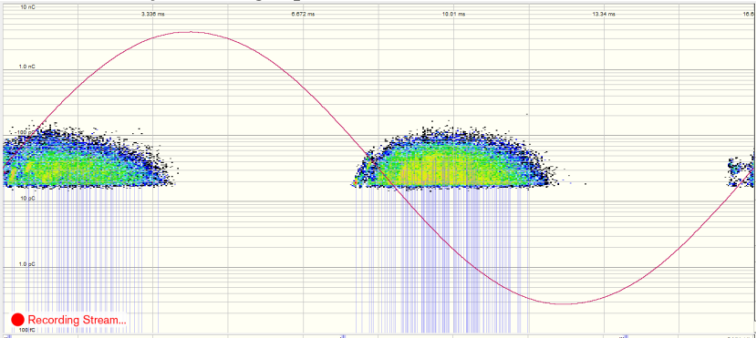
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 82 – Medição descargas parciais -13,8kV – amostra 9



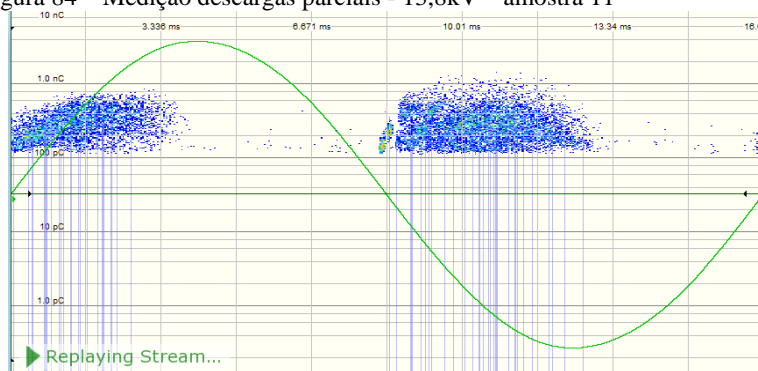
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 83 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 10



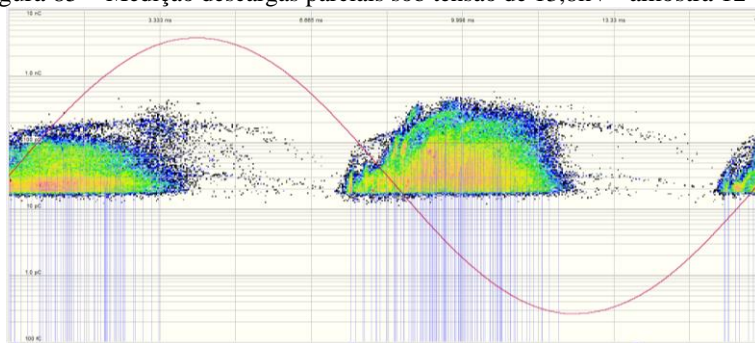
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 84 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 11



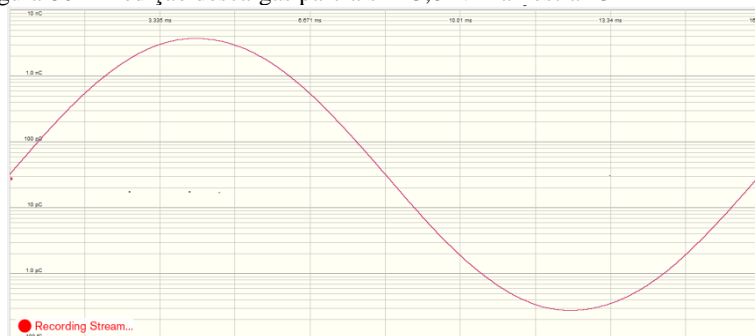
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 85 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV – amostra 12



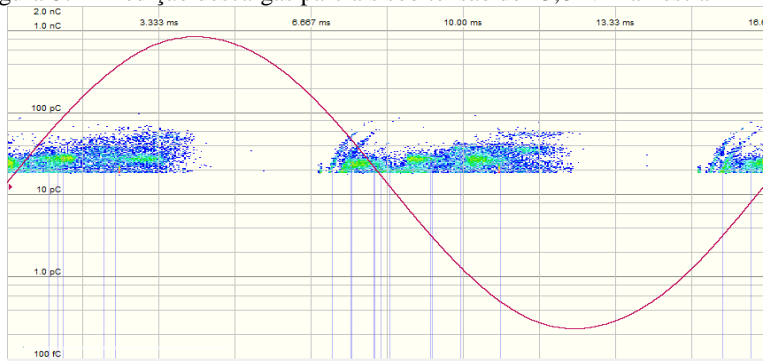
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 86 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 13



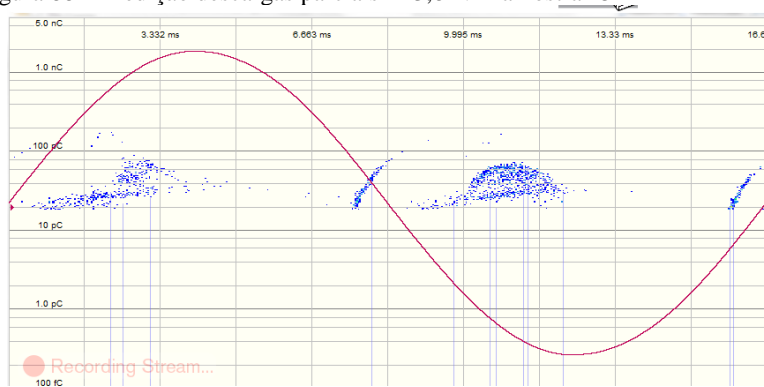
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 87 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV – amostra 14



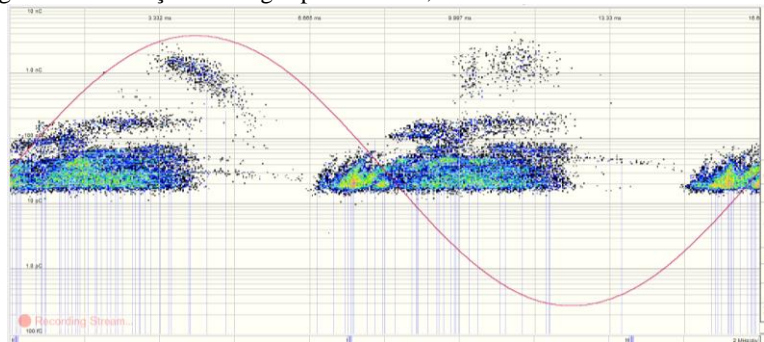
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 88 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 15



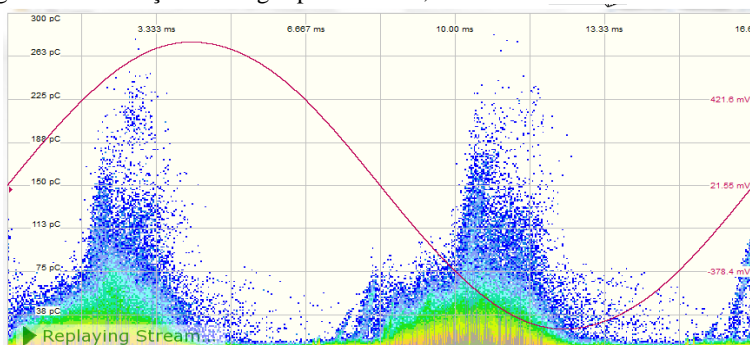
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 89 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 16



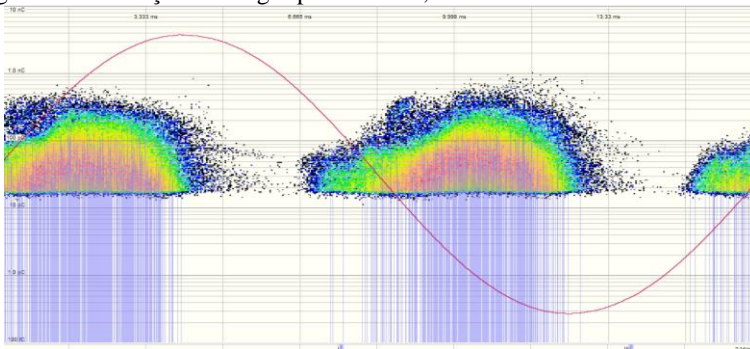
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 90 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 17



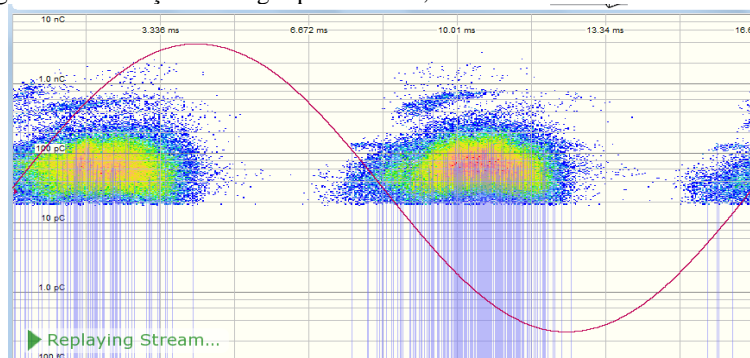
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 91 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 18



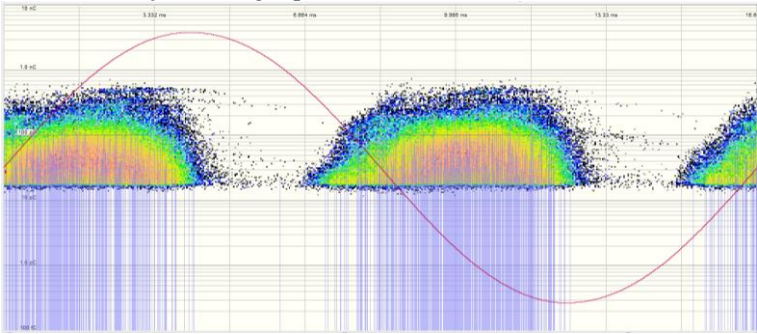
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 92 – Medição descargas parciais - 13,8kV – amostra 19



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Figura 93 – Medição descargas parciais -13,8kV – amostra 20



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

4.3 – Classificação das amostras

Apresentam-se todos os resultados dos ensaios realizados e a justificativa para escolha e eliminação das amostras. Para cada um dos ensaios demonstra-se o comportamento de cada lote de amostras e no fim de cada seção a comparação entre a amostra escolhida por apresentar a característica da falha simulada e a amostra padrão.

4.3.1 – Resultados dos ensaios das amostras fabricadas

Na Tabela 9 são apresentados os resultados dos ensaios em todas as amostras fabricadas e nesta seção será apresentada a justificativa para classificação das amostras.

Tabela 7 – Resultados dos ensaios nas amostras

Número da amostra	Resposta do dielétrico								
	Resistência da Isolação – 1 minuto (Ω)	Resistência da Isolação – 10 minutos (Ω)	Índice de polarização	Tan Delta sob 2,56kV _{CA} (%)	Tip-Up (%)	Δ Tan σ (%)	Valor médio da Capacitância (nF)	Descargas Parciais (pC)	Descontinuidade sob rampa CC (kV _{CC})
1	1,01E+12	2,85E+12	2,81	0,97	0,10	0,26	0,61	22,65	*
2	9,70E+11	1,73E+12	1,78	0,95	0,06	0,06	0,58	28,24	*
3	5,94E+11	2,08E+12	3,51	4,50	0,08	0,09	0,60	317,7	10,00
4	1,45E+12	5,98E+12	4,14	0,92	0,05	0,05	0,58	53,19	*
5	5,92E+11	1,42E+12	2,40	1,03	0,04	0,05	0,67	82,06	*

Número da amostra	Resposta do dielétrico								
	Resistência da Isolação – 1 minuto (Ω)	Resistência da Isolação – 10 minutos (Ω)	Índice de polarização	Tan Delta sob 2,56kV _{CA} (%)	Tip-Up (%)	Δ Tan σ (%)	Valor médio da Capacitância (nF)	Descargas Parciais (pC)	Descontinuidade sob rampa CC (kV _{CC})
6	1,16E+12	4,12E+12	3,56	1,02	0,04	0,04	0,71	441,0	9,00
7	1,09E+12	3,23E+12	2,97	1,16	0,15	0,19	0,72	160,7	*
8	1,07E+12	3,36E+12	3,15	1,11	0,09	0,12	0,73	130,2	*
9	1,67E+12	4,46E+12	2,68	1,24	0,21	0,23	0,70	134,1	*
10	1,52E+12	6,66E+12	4,38	0,89	0,04	0,04	0,54	94,1	*
11	1,12E+12	3,66E+12	3,28	0,98	0,06	0,08	0,59	720,0	14,00
12	1,44E+12	4,57E+12	3,17	1,07	0,13	0,14	0,62	312,3	*
13	1,04E+12	2,79E+12	2,69	1,11	0,12	0,12	0,69	<2pC	*
14	1,70E+11	1,75E+11	1,03	1,08	0,09	0,12	0,50	42,95	*
15	6,52E+11	1,98E+12	3,04	1,00	0,07	0,08	0,67	132,8	10,00
16	1,39E+12	3,65E+12	2,62	0,94	0,07	0,12	0,55	1331	*
17	1,34E+12	4,15E+12	3,10	1,10	0,07	0,09	0,57	214,4	*
18	1,39E+12	3,32E+12	2,38	1,18	0,13	0,17	0,56	349,0	*
19	6,47E+11	3,12E+12	4,83	1,16	0,09	0,10	0,53	982,8	*
20	2,05E+11	5,47E+11	2,67	0,86	0,15	0,21	0,50	322,9	9,00

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A classificação das amostras para elaboração desta investigação seguiram os critérios da Tabela 8. Para cada tipo de falta criada era esperado um comportamento para cada ensaio.

Tabela 8 – Classificação das amostras

Amostras	Índice de polarização	Resistência da isolação – 1minuto	Tip Up	Descargas parciais
Processo normal (1 a 4)	≥ 2	Valor elevado	Menor possível	Menor possível
Cura incompleta (5 a 8)	< Processo normal	< Processo normal	> Processo normal	\cong Processo normal

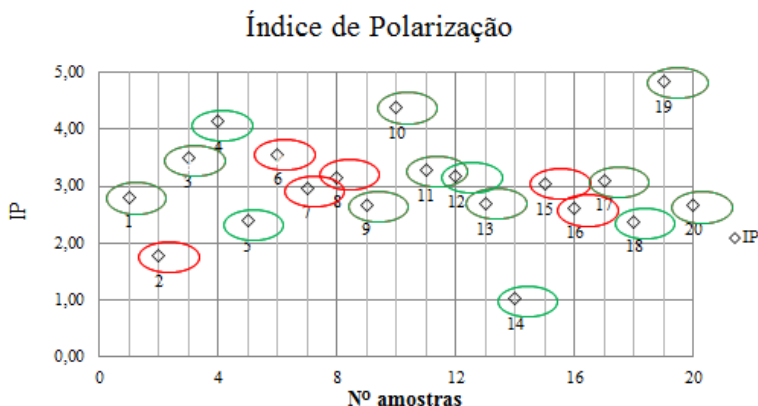
Amostras	Índice de polarização	Resistência da isolamento – 1minuto	Tip Up	Descargas parciais
Dano na fita de proteção (9 a 12)	≥ 2	\cong Processo normal	> Processo normal	> Processo normal
Contaminante interno (13 a 16)	< Processo normal	< Processo normal	> Processo normal	\cong Processo normal
Baixa tração durante enfitamento (17 a 20)	≥ 2	\cong Processo normal	> Processo normal	> Processo normal

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

As amostras de processo normal obrigatoriamente devem apresentar índice de polarização maior que a referência de norma, resistência da isolamento após 1 minuto de ensaio com valor elevado, baixo nível de perdas dielétricas, as quais foram avaliadas através do Tip Up e baixa magnitude de descargas parciais. As amostras com cura incompleta devem apresentar índice de polarização e resistência da isolamento a 1 minuto menor que a referência (processo normal), perdas dielétricas maiores que a amostra do processo normal e mesma magnitude de descargas parciais. As amostras com dano na fita de proteção contra descargas parciais devem apresentar as mesmas características da amostra do processo normal exceto o Tip Up e a magnitude das descargas parciais. As amostras contaminadas devem ter as mesmas características da amostra com cura incompleta exceto pela intensidade da condutividade das amostras. As amostras com baixa tração de enfitamento foram fabricadas para ter as mesmas características elétricas da amostra padrão exceto pela quantidade de cavidades internas e magnitude de descargas parciais. Para garantir a característica das amostras fabricadas os ensaios dielétricos foram conduzidos e cada uma das amostras foi aprovada ou rejeitada no ensaio.

Na Figura 94 são mostrados os resultados da determinação de índice de polarização para todas as amostras. As amostras que estão marcadas em cor vermelha não apresentam comportamento esperado.

Figura 94 – Medição do índice de polarização

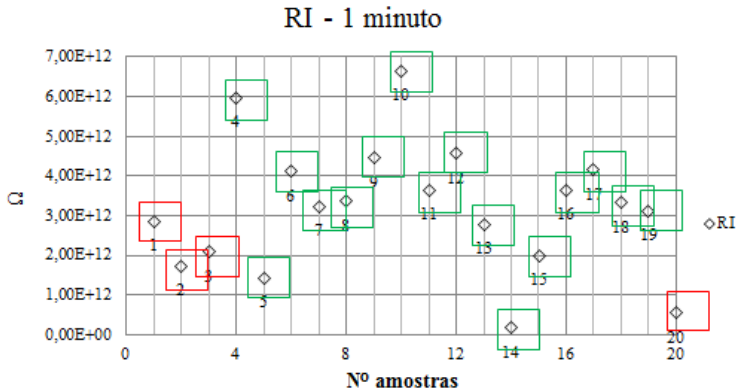


Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Os valores de índice de polarização estão compreendidos entre 1 e aproximadamente 5. Das amostras 1 a 4 desclassifica-se a amostra 2 por apresentar IP menor que a referência de norma e classifica-se a amostra 4 por apresentar o melhor índice de polarização. Das amostras 5 a 8, apenas a amostra 5 foi classificada por apresentar maior condução. Da amostra 9 a 12 aprovou-se a amostra 12 por apresentar curva de polarização semelhante à curva de polarização da amostra 18. Da amostra 13 a 16 a amostra 14 apresentou maior condução e índice de polarização menor do que 2. Da amostra 17 a 20 a amostra 18 apresentou a melhor característica de cavidades durante o monitoramento da curva de polarização.

Avaliando todos os resultados das amostras para a medição da resistência da isolamento após um minuto do ensaio é possível verificar a coerência no comportamento das amostras selecionadas pelo ensaio de índice de polarização. A amostra 4 possui o maior valor entre as amostras aprovadas, seguida pelas amostras 12 e 18. A amostra 5 e 14, as quais possuem maior condução apresentaram valores coerentes com esse comportamento.

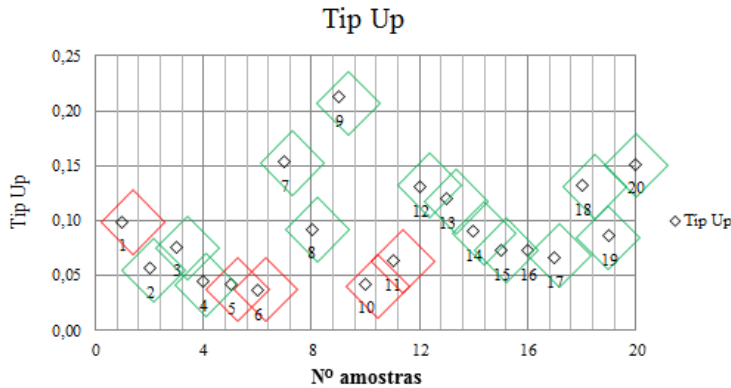
Figura 95 – Medição da resistência da isolamento – 1 minuto



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Durante a avaliação do Tip Up, Figura 96, as amostras 4,5 e 14 apresentaram valores de perdas dielétricas menores que as amostras 12 e 18 que possuem cavidades externas e internas, respectivamente.

Figura 96 - Medição do Tip Up

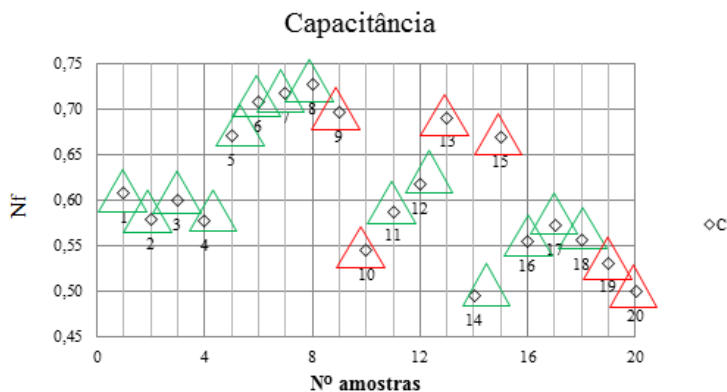


Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A Figura 97 mostra os resultados da medição da capacitância. As amostras 1 a 4 apresentaram coerência, pois as medições possuem valores aproximados. Existe também uma coerência dos resultados para as amostras com cura incompleta (amostra 5 a 8), pois todas apresentaram valores maiores que a referência (amostra 4). Das

amostras 14 a 17, a amostra 14 possui a menor capacitância, ou seja, tem menor capacidade de isolamento pelo comportamento condutivo da simulação da contaminação.

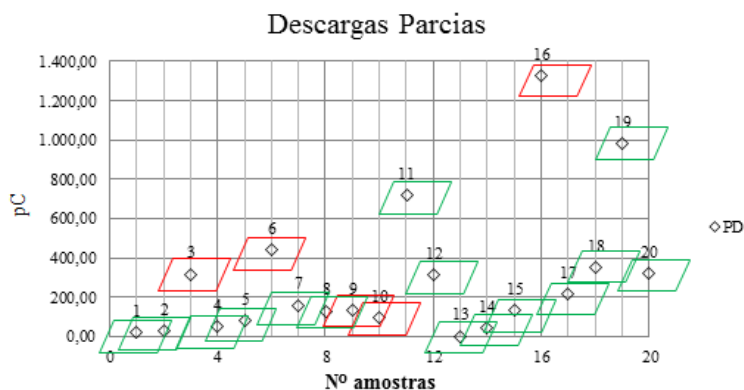
Figura 97 – Medição da capacitância



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

As medições de descargas parciais da Figura 98 mostram que as amostras 4, 5 e 14 que não foram fabricadas para apresentar elevada magnitude de descargas parciais e possuem valores relativamente semelhantes.

Figura 98 – Medição das descargas parciais

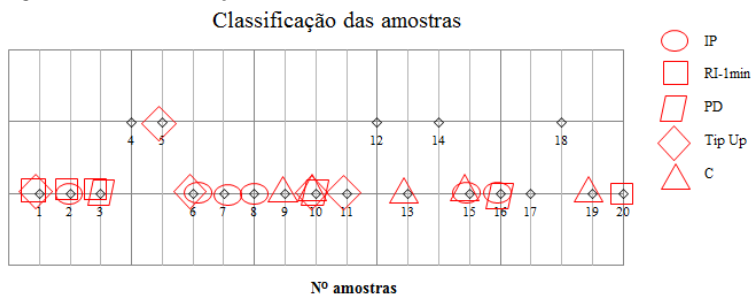


Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

As amostras 12 e 18 apresentam valores de magnitude de 3 a quatro vezes maiores do que referência (amostra padrão). As amostras 16, 6 e 3, que não deveriam ter elevada magnitude de descargas parciais, foram desclassificadas por apresentar valores elevados.

Na Figura 99 apresenta-se o comportamento de todas as amostras durante os ensaios de classificação. As amostras 1,2,3,6,10,15,16 apresentaram comportamento incoerente com a fabricação em mais de um ensaio, conforme indicado.

Figura 99 - Classificação das amostras



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

As amostras 5,7,8,11,13,19 e 20 foram rejeitadas em apenas um dos ensaios. Toda amostra incoerente com o objetivo de simulação da falha foi descartada e ficaram aprovadas as amostras 4, 12, 14, 17 e 18.

A amostra 5 não apresentou um valor Tip Up expressivo mais foi aprovada por apresentar condutividade ideal para seguir no estudo. A amostra 17, apesar de ser aprovada nos ensaios foi excluída por apresentar um padrão de descargas parciais menos interessante para simulação de cavidades.

4.4 – Avaliação sobre as amostras classificadas

Em virtude da classificação de uma amostra de cada tipo de falta simulada apresenta-se nessa seção o comportamento das amostras quanto aos ensaios dielétricos realizados.

4.4.1 – Resistência da isolação

Os valores de resistência da isolação medidos durante 1 minuto de ensaio são apresentados na Tabela 9.

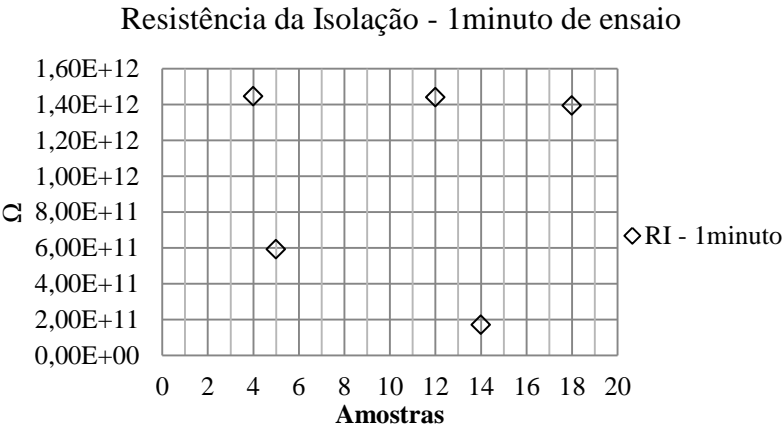
Tabela 9 – Resultados do ensaio de medição da resistência da isolação a 1 minuto

Amostras	Nº das amostras	Ω
Processo normal	4	1,44E+12
Cura incompleta	5	5,92E+11
Dano na fita de proteção	12	1,44E+12
Contaminante interno	14	1,70E+11
Baixa tração durante enfitamento	18	1,39E+12

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A Figura 100 mostra o gráfico dos valores das respostas da isolação da Tabela 9. A amostra número 14, que está contaminada, obteve o menor valor da resistência da isolação em função das propriedades do material a base de carbono utilizado durante a simulação da falha. A amostra número 5 com cura incompleta possui valor abaixo do padrão de referência, número 4.

Figura 100 – Resultado do ensaio de resistência da isolação



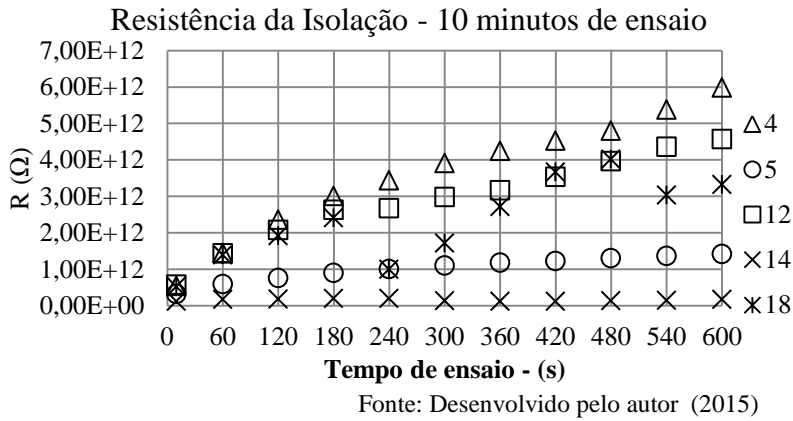
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A amostra número 18 com baixa tração de enfitamento e 12 com dano na fita de proteção contra descargas parciais tiveram valores próximos a amostra padrão, número 4.

4.4.2 – Índice de polarização

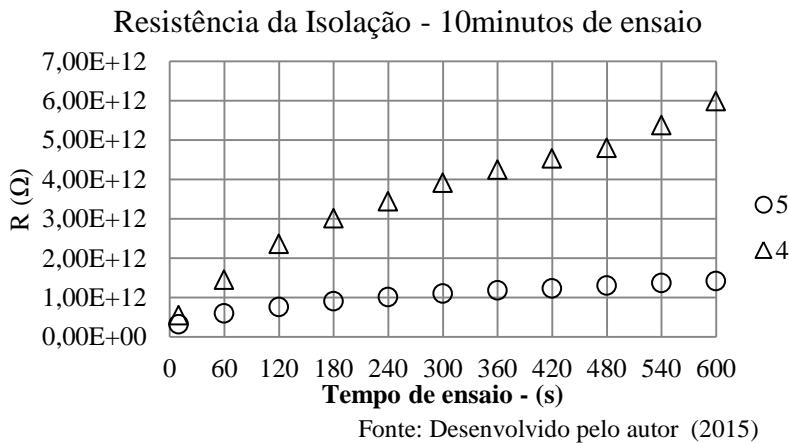
Os resultados da medição da resistência da isolamento das amostras, ao longo dos 10 minutos de ensaio, são mostrados na Figura 101.

Figura 101 – Ensaio para determinação do índice de polarização



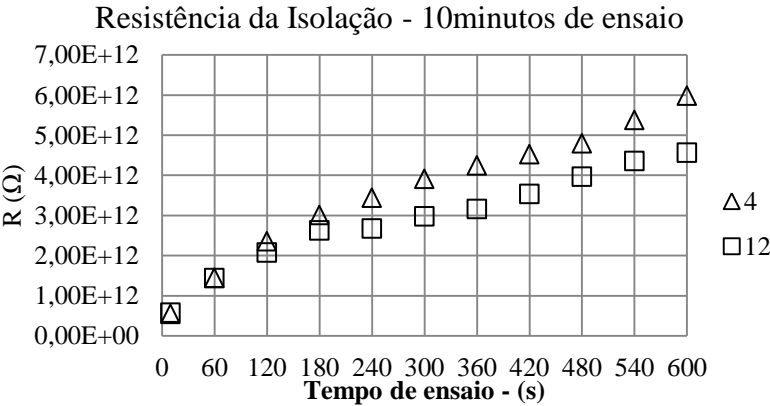
A amostra com cura incompleta, conforme Figura 102, número 5, apresenta o índice de polarização menor que a amostra padrão, número 4.

Figura 102 – Comparação entre amostra 4 e 5 para o ensaio de resistência da isolamento com 10 minutos de ensaio



Na Figura 103, tem-se a curva de polarização da amostra 12 que apresenta falta por contaminação.

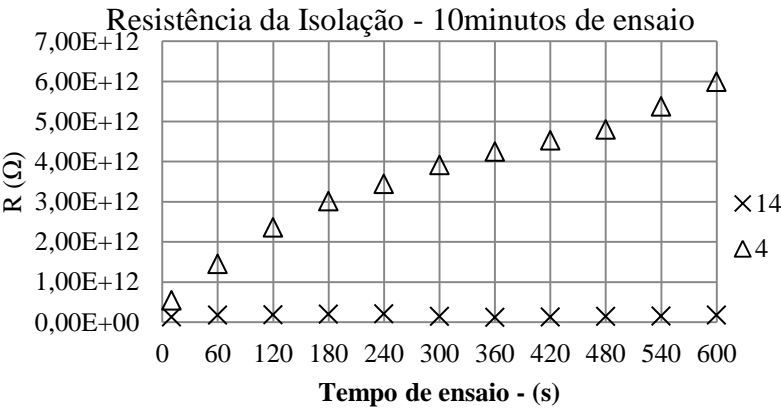
Figura 103 – Comparação entre amostra 4 e 12 para o ensaio de resistência da isolação com 10 minutos de ensaio



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A amostra número 14, conforme Figura 104, que possui contaminação, apresenta o menor valor de índice de polarização.

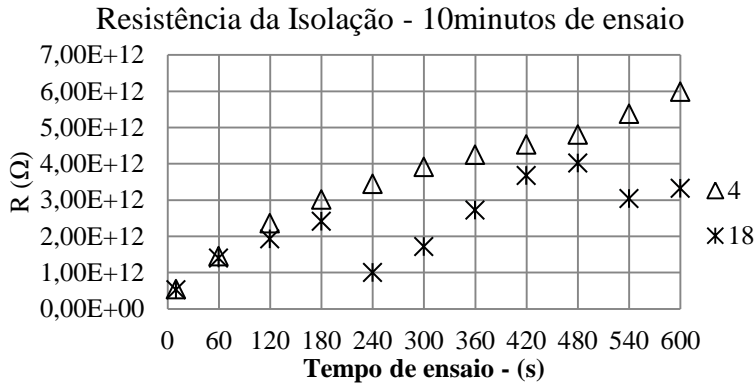
Figura 104 – Comparação entre amostra 4 e 14 para o ensaio de resistência da isolação com 10 minutos de ensaio



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

As cavidades provocadas durante a fabricação das amostras, número 18, com baixa tração de enfitamento, e número 12 com dano na proteção de descargas, provocam o acúmulo das cargas nas fronteiras das cavidades impedindo o deslocamento das cargas para o eletrodo de medição. Esse comportamento provoca um efeito na curva de polarização que pode ser verificado com clareza no resultado da medição da amostra 18 na Figura 105.

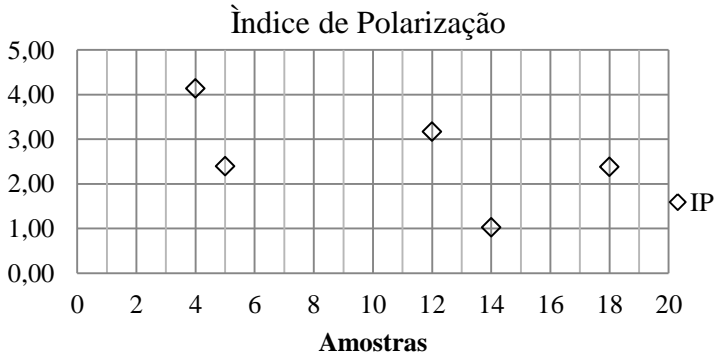
Figura 105 – Comparação entre amostra 4 e 18 para o ensaio de resistência da isolação com 10 minutos de ensaio



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

O valor do índice de polarização é mostrado no gráfico da Figura 106 e Tabela 10.

Figura 106 – Índice de polarização entre amostras



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A Tabela 10 apresenta o índice de polarização em função dos valores de resistência da isolamento durante o tempo de ensaio.

Tabela 10 – Resultados do ensaio de medição do índice de polarização

Amostras	Nº das amostras	Ω - 1minuto	Ω - 10 minutos	IP
Processo normal	4	1,44E+12	5,98E+12	4,14
Cura incompleta	5	5,92E+11	1,42E+12	2,40
Dano na fita de proteção	12	1,44E+12	4,57E+12	3,17
Contaminante interno	14	1,70E+11	1,75E+11	1,03
Baixa tração durante enfitamento	18	1,39E+12	3,32E+12	2,38

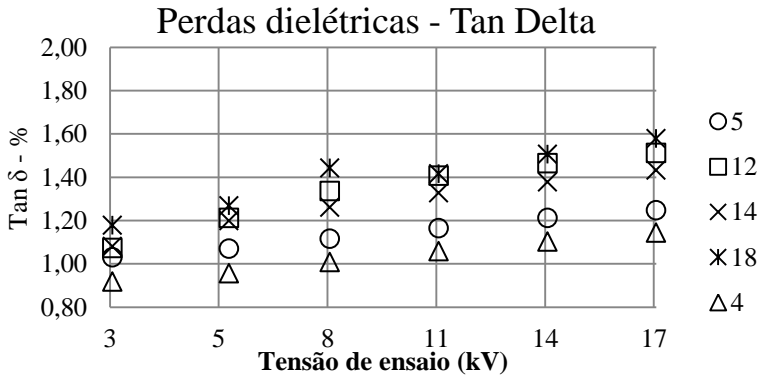
Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2015)

Nota-se que o índice de polarização está em desacordo com as recomendações de norma apenas para a amostra 14, que está contaminada.

4.4.3 – Perdas dielétricas

Conforme apresentados nos capítulos anteriores, as perdas dielétricas estão diretamente relacionadas com a soma das perdas de todos os mecanismos de falhas. A Figura 107 mostra o resultado do ensaio da Tan δ nas amostras sob estudo.

Figura 107 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Os termos utilizados para avaliação das perdas dielétricas são descritos em normas internacionais pelo Tip-Up, que representa a média entre o terceiro e o primeiro degrau de tensão de ensaio, e o valor $\Delta \tan \delta$ que representa a máxima variação de $\tan \delta$ entre os seis degraus da tensão de ensaio. O degrau de tensão de ensaio é determinado por norma, conforme Tabela 11, para que intencionalmente a intensidade do campo elétrico seja alterada durante a investigação e os mecanismos de falhas possam ser detectados. Na Tabela 11 são apresentados os resultados do ensaio de perdas dielétricas para todas as amostras aprovadas.

Tabela 11 – Resultados do ensaio de perdas dielétricas

Amostras	Nº das amostras	Tensão de ensaio – (kV _{CA})				
		2,56	8,28	11,04	13,80	16,56
		Perdas dielétricas – $\tan \delta$ (%)				
Processo normal	4	0,92	0,96	1,01	1,06	1,10
Cura incompleta	5	1,03	1,07	1,11	1,16	1,21
Dano na fita de proteção	12	1,07	1,21	1,33	1,41	1,46
Contaminante interno	14	1,08	1,20	1,26	1,33	1,38
Baixa tração durante enfitamento	18	1,18	1,27	1,44	1,41	1,51

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A Tabela 12 apresenta os critérios utilizados sobre os resultados das amostras com faltas de isolamento.

Tabela 12 – Resultados do ensaio de perdas dielétricas

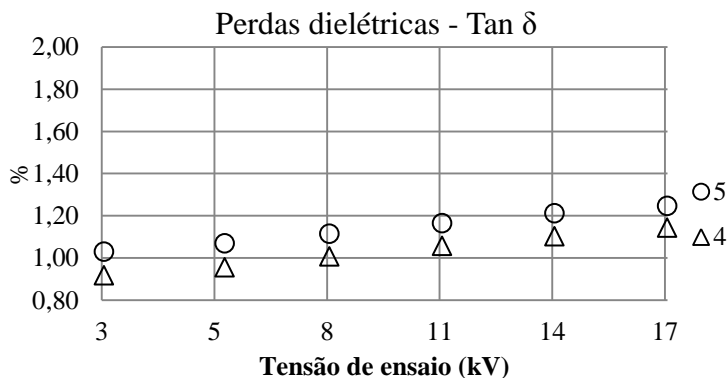
Amostras	Nº das amostras	Critérios para avaliação		
		Tan Delta 2,56kV (%)	Tip-Up (%)	$\Delta \tan \delta$ (%)
Processo normal	4	0,92	0,05	0,05
Cura incompleta	5	1,03	0,04	0,05
Dano na fita de proteção	12	1,07	0,13	0,14
Contaminante interno	14	1,08	0,09	0,12
Baixa tração durante enfitamento	18	1,18	0,13	0,17

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Apesar das perdas dielétricas da amostra 5, conforme Figura 108, não serem tão expressivas quanto às amostras com cavidades, ela ainda

apresenta valores de perdas maiores que a amostra padrão. O comportamento da amostra 5 está relacionado com o nível de condução atingido durante a cura incompleta.

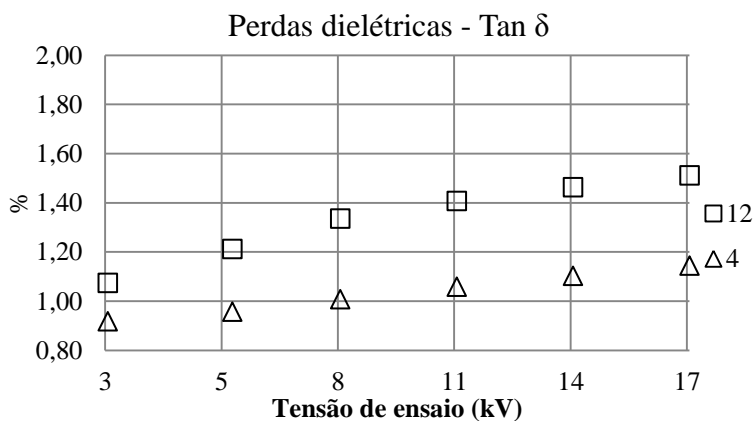
Figura 108 – Comparação entre amostra 4 e 5 para o ensaio de perdas dielétricas



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A amostra número 12 com dano na proteção contra descargas parciais apresentou valor elevado de fator de perdas dielétricas em função do tamanho dos vazios criados durante a fabricação.

Figura 109 – Comparação entre amostra 4 e 12 para o ensaio de perdas dielétricas



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

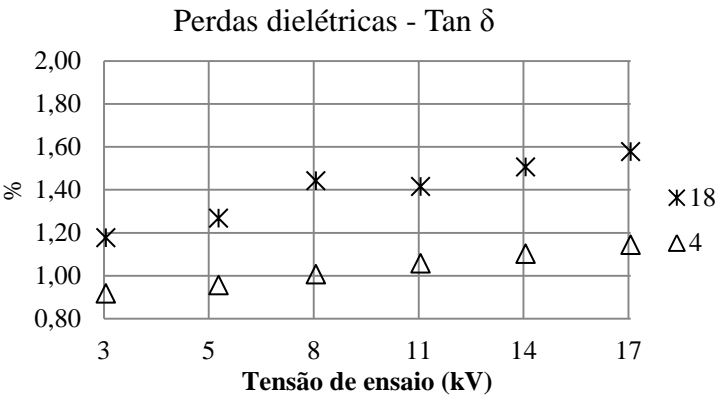
A amostra número 14, conforme Figura 110, com contaminação apresentou Tip-Up menor que a amostra 18 com vazios, mas apresenta perdas significativas por condução.

Figura 110 – Comparação entre amostra 4 e 14 para o ensaio de perdas dielétricas



O resultado da amostra 18, conforme Figura 111, apresenta o valor mais elevado de Tip-Up. Como já comprovado por diversos estudos e publicado em normas, as amostras que tiverem elevada incidência de descargas parciais tenderão a apresentar Tip-Up mais elevado.

Figura 111 - Comparação entre amostra 4 e 18 para o ensaio de perdas dielétricas

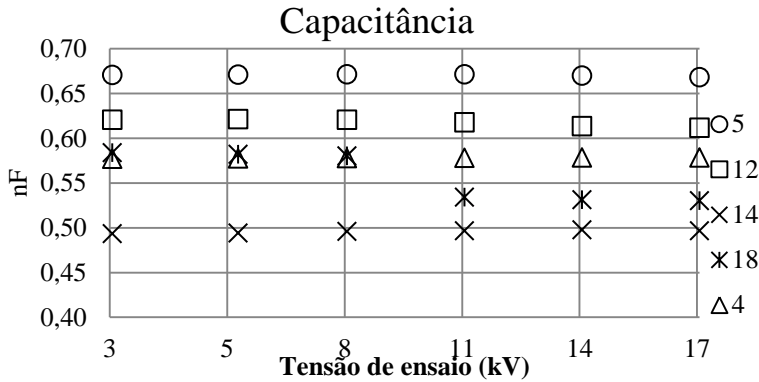


Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

4.4.4 – Capacitância

Na Figura 112 observa-se o comportamento da capacitância ao longo da execução do ensaio de 2,56kV até 17kV.

Figura 112 – Resultado do ensaio de capacitância



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Na Tabela 13 são mostrados todos os resultados de capacitância durante a medição nos mesmos seis degraus de tensão de ensaio.

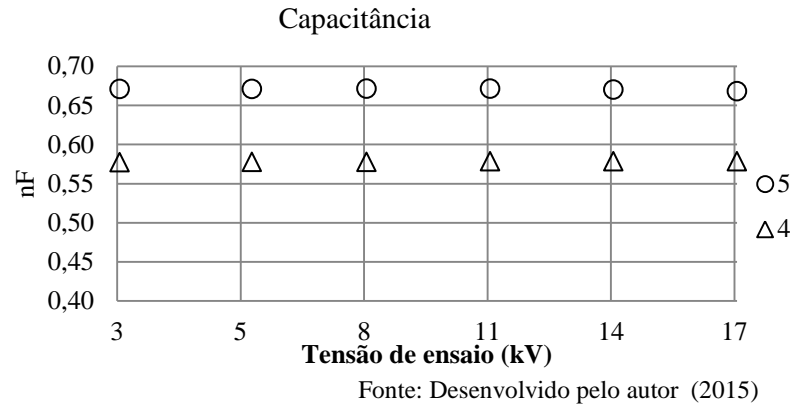
Tabela 13 – Resultados do ensaio de capacitância

Amostras	Nº das amostras	Tensão de ensaio – (KV _{CA})				
		2,56	8,28	11,04	13,80	16,56
		Capacitância - nF				
Processo normal	4	0,577	0,577	0,577	0,578	0,578
Cura incompleta	5	0,671	0,671	0,671	0,671	0,670
Dano na fita de proteção	12	0,620	0,621	0,620	0,617	0,613
Contaminante interno	14	0,493	0,494	0,496	0,496	0,497
Baixa tração durante enfitamento	18	0,584	0,582	0,580	0,534	0,531

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

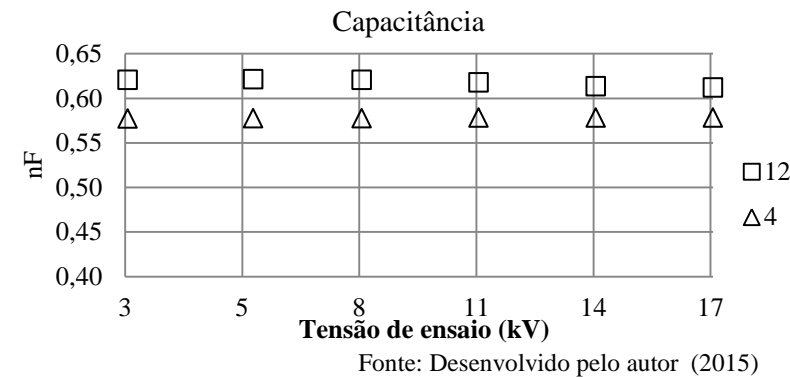
A amostra número 5, que possui cura incompleta apresenta capacitância maior que a amostra padrão devido à interrupção do processo químico envolvido durante a cura.

Figura 113 – Comparação entre amostra 4 e 5 para o ensaio de capacitância



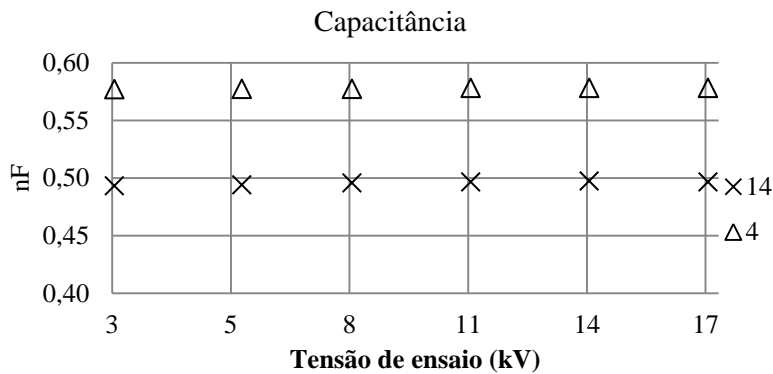
A amostra número 12 que possui dano na fita de proteção contra descargas parciais apresenta leve decréscimo do valor da capacitância nas tensões mais elevadas, onde detecta-se a atividade de descargas parciais.

Figura 114 – Comparação entre amostra 4 e 12 para o ensaio de capacitância



A amostra número 14, que está contaminada e que possui elevada condução, apresentou valor menor de capacitância, conforme Figura 115, que a amostra número 4 padrão. Normalmente, quando há uma diminuição da capacidade do dielétrico, ocorre um aumento da corrente de fuga, o que corresponde a diminuição do valor da capacitância, ou seja, menor capacidade de isolamento.

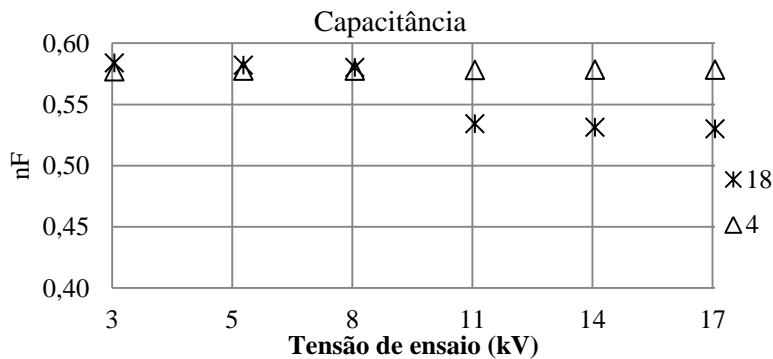
Figura 115 – Comparação entre amostra 4 e 14 para o ensaio de capacitância



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Para a amostra número 18 com cavidades internas, conforme Figura 116, detectou-se decréscimo do valor da capacitância no nível de tensão em que existe atividade de descarga parcial.

Figura 116 - Comparação entre amostra 4 e 18 para o ensaio de capacitância



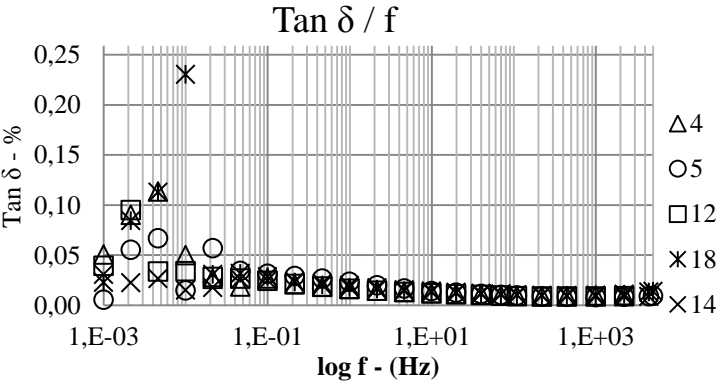
Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

4.4.5 – Perdas dielétricas com frequência de ensaio variável

A Figura 117 mostra as perdas dielétricas das amostras dentro do intervalo de frequência de 1mHz a 5kHz sob uma tensão de teste de

200V. No intervalo de 1mHz à 100mHz, nota-se que as perdas dielétricas sofreram maior variação.

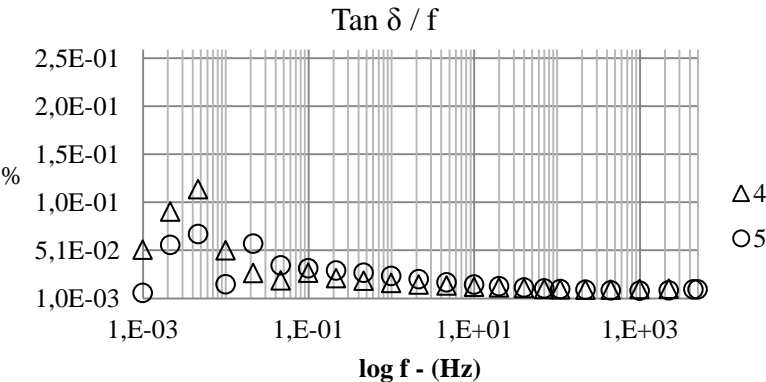
Figura 117 – Resultado do ensaio de perdas dielétricas com variação da frequência



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

O resultado da amostra 5, na Figura 118, que possui cura incompleta, apresenta perdas por mecanismos de polarização pouco expressiva quando comparado a uma amostra de isolamento ideal.

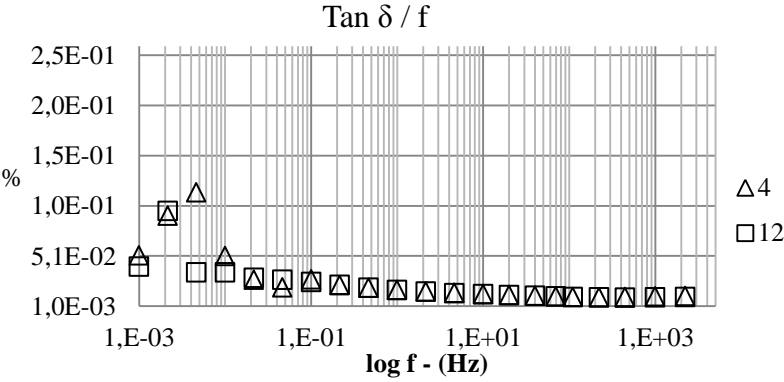
Figura 118 – Comparação entre amostra 4 e 5 para o ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A amostra 12, que possui cavidades na superfície, apresenta perdas por mecanismos de polarização pouco expressiva, veja Figura 119, quando comparada a uma amostra de isolamento ideal.

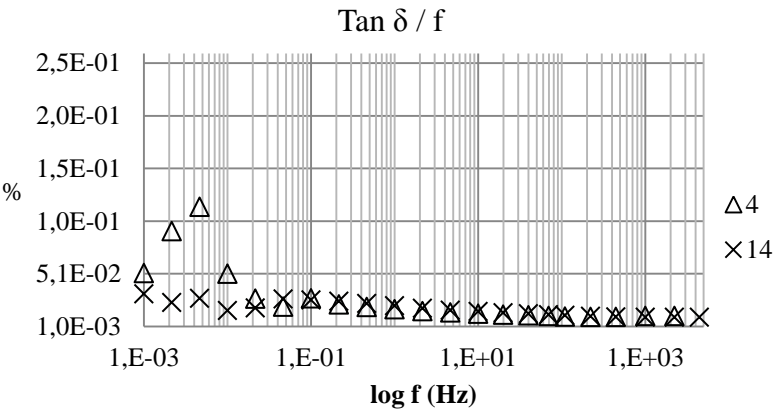
Figura 119 – Comparação entre amostra 4 e 12 para o ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Na Figura 120 observa-se que a amostra 14, que está contaminada possui perdas por mecanismos de polarização menores que a amostra padrão.

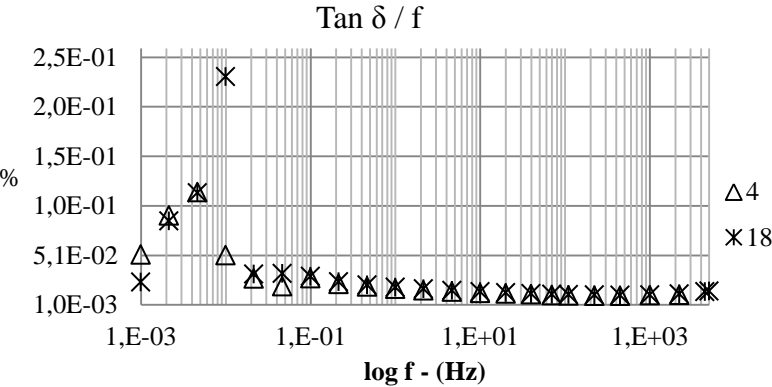
Figura 120 – Comparação entre amostra 4 e 14 para o ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Destaca-se entre as medições da Figura 121 a amostra com cavidades internas, pois possui um comportamento coerente com a curva de dispersão, ou seja, as perdas por polarização por cargas espaciais são maiores do que nas demais amostras.

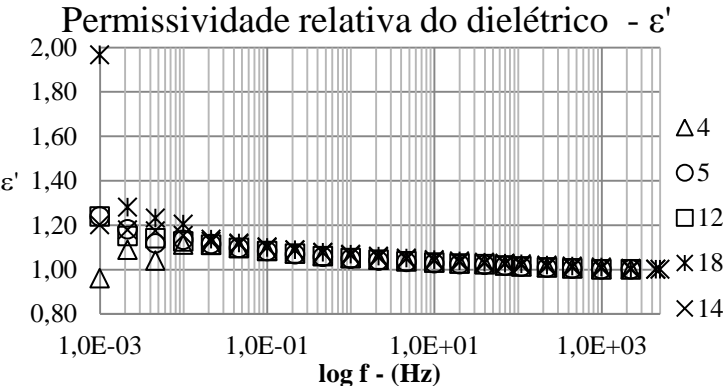
Figura 121 – Comparação entre amostra 4 e 18 para o ensaio de perdas dielétricas com mudança da frequência da tensão de ensaio



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A Figura 122 mostra o valor da permissividade do dielétrico das amostras durante a variação na frequência da tensão de ensaio. Para frequências abaixo de 10mHz testa-se o comportamento da amostra 18 com cavidades internas.

Figura 122 – Medição da permissividade do dielétrico das amostras

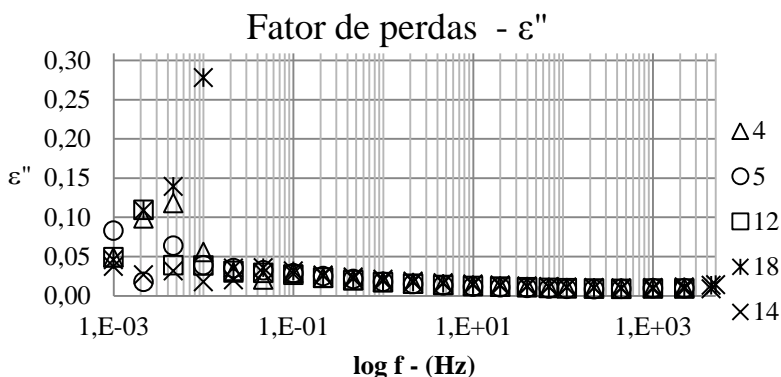


Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A polarização por cargas espaciais na fronteira das cavidades internas contribui com mais intensidade sobre a permissividade relativa do que nas outras amostras. A amostra 4, padrão, que possui um valor alto de índice de polarização, não possui elevada quantidade de cavidades e tem baixa condução, apresentou o menor valor de permissividade à 1mHz.

O fator de perdas apresentado na Figura 123 mostra que a amostra número 5 com cura incompleta apresenta o maior fator de perda à 1mHz devido à maior condutividade.

Figura 123 – Medição do fator de perdas do dielétrico das amostras



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A amostra número 18 com cavidades internas apresenta valor expressivo à 10mHz devido à polarização das cargas espaciais nas interfaces entre o dielétrico e as cavidades. As demais amostras apresentaram fator de perdas semelhantes, possivelmente porque os seus fenômenos envolvidos não possuem significativa influência sob o ensaio em tensão de 200V com frequência variável. O resultado das perdas dielétricas, permissividade e fator de perdas não apresentaram diferenças significativas para frequências maiores que 100mHz. Esse comportamento é devido à incompatibilidade do tempo de relaxação de cada mecanismo de polarização e a frequência da tensão de ensaio.

4.4.6 – Descargas parciais

Os ensaios foram realizados buscando respeitar os mesmos graus de tensão utilizados nos ensaios de perdas dielétricas e capacitância para que fosse possível relacionar a tensão de início e a magnitude das descargas parciais. Um dos grandes desafios na medição e monitoramento das descargas parciais é o ruído de fundo durante os ensaios. Eles contribuem de forma negativa sobre o resultado do teste, dificultando a interpretação dos resultados. Para evitar essas perturbações, a fonte externa utilizada para energização da amostra possui etapa de filtro que reduz o ruído durante as medições. A Tabela 14 apresenta os resultados dos ensaios de descargas parciais para as cinco amostras. Os valores de magnitude são fornecidos automaticamente pelo equipamento MPD600-Omicron. A amostra número 4 padrão apresentou o menor nível de descargas parciais. A amostra 18, com baixa tração durante enfitamento, apresentou a maior magnitude.

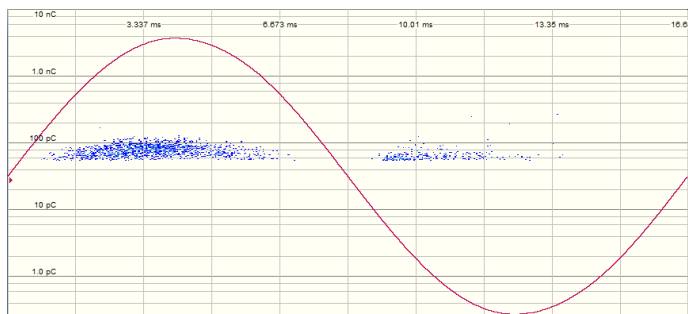
Tabela 14 – Resultado do ensaio de descargas parciais

Amostras	Nº das amostras	Tensão de início das descargas parciais (kV)	Magnitude das descargas parciais (pC)
Processo normal	4	13,80	53,19
Cura incompleta	5	11,04	82,06
Dano na fita de proteção	12	5,52	312,3
Contaminante interno	14	8,28	42,95
Baixa tração durante enfitamento	18	8,28	349,0

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

O padrão para as descargas parciais definidos por AZUAJE (2006) na Figura 32, mostra que é possível identificar a posição da descarga parcial, em relação à seção transversal da amostra, através da magnitude entre as descargas positivas (+PD) e negativas (-PD). A Figura 124 apresenta o resultado do ensaio de descargas parciais da amostra número 4, padrão, sob tensão de 13,8kV. Nessa figura é possível verificar que o primeiro semiciclo apresenta uma leve diferença

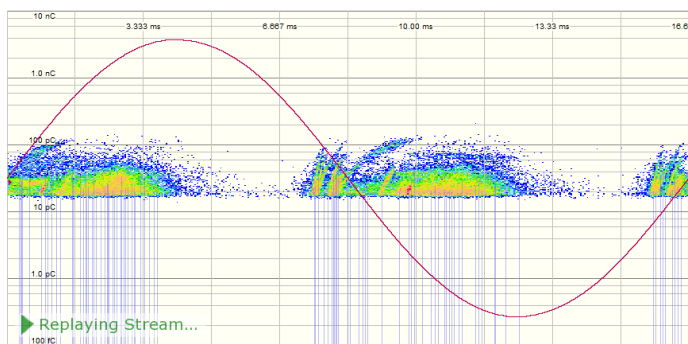
em relação ao segundo-ciclo. Essa diferença demonstra que as descargas parciais são por cavidades internas e estão mais próximas ao condutor. Figura 124 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV – amostra 4



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A Figura 125 apresenta o resultado de medição das descargas parciais sob tensão de 13,8kV na amostra 5, que possui cura incompleta. Apesar do processo de cura ter sido interrompido a magnitude das descargas parciais não é elevada se comparada à amostra número 4. Isso significa que não foram criadas cavidades internas pela interrupção do processo de cura da resina epóxi do sistema de isolamento.

Figura 125 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV – amostra 5

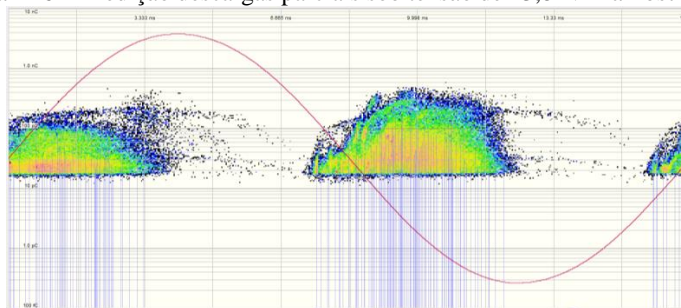


Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A Figura 126 apresenta a magnitude e o padrão das descargas parciais para a amostra número 12 que possui um dano na superfície da amostra. Ela apresenta no segundo e quarto ciclo da senóide outra fonte de descargas que pode ser classificada como ruído e foi desconsiderada

durante a avaliação deste padrão. O resultado apresenta desbalanceamento entre os dois semiciclos, o qual foi provocado pela simulação de falhas na proteção contra descargas parciais na superfície da amostra.

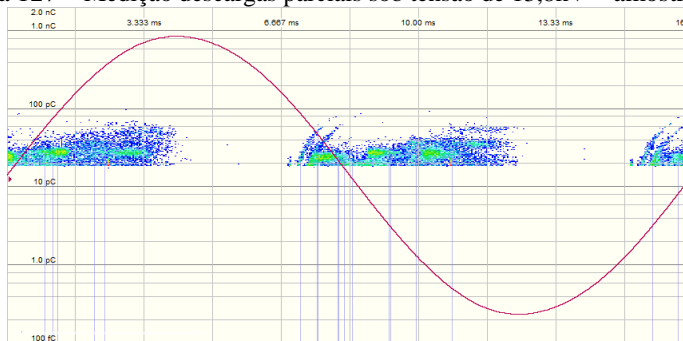
Figura 126 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV – amostra 12



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Como planejado, veja Figura 127, a amostra contaminada, não deveria apresentar elevado nível de descargas parciais, pois a isolamento possui as mesmas características da isolamento padrão, exceto pelo material condutivo simulando a contaminação.

Figura 127 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV – amostra 14

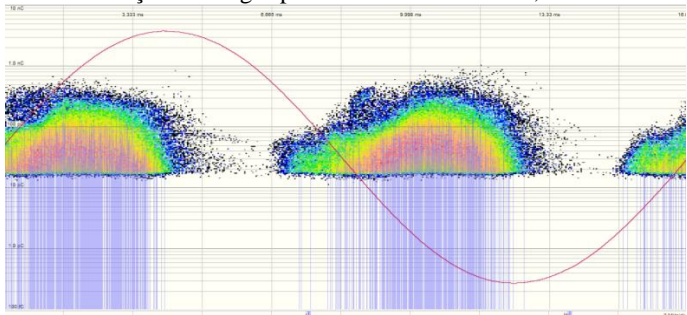


Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A Figura 128 demonstra o resultado da medição de descargas parciais para a amostra 18 com cavidades internas. A amostra com baixa tração de enfitamento, para simulação de descargas internas, apresentou nível adequado para simulação da falha e balanceamento entre os dois

semiciclos. O balanceamento dos semiciclos demonstra que a magnitude e a taxa de repetição das descargas parciais positivas e negativas são semelhantes.

Figura 128 – Medição descargas parciais sob tensão de 13,8kV – Amostra 18



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Um dos principais objetivos da determinação da magnitude das descargas parciais era estabelecer parâmetros para validação das hipóteses sobre os demais ensaios. Para todas as amostras aprovadas para estudo, o nível e o padrão de descargas parciais apresentados podem ser considerados satisfatórios.

4.4.7 – Rampa em tensão contínua

Os ensaios sob rampa CC foram executados seguindo a orientação de IEEE 95 (2002) respeitando a taxa de 1kV/min, até atingir 15kVcc por limitação da fonte de tensão contínua. Na Tabela 15 apresentam-se os valores de corrente medidos a cada intervalo de tensão da rampa programada.

Tabela 15 – Resultados do ensaio de rampa em tensão contínua

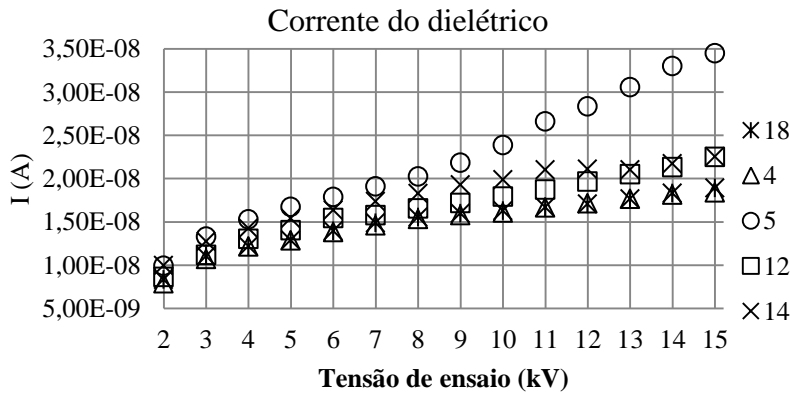
Tensão de ensaio (kV _{CC})	Corrente no dielétrico (A)				
	Amostras				
	Processo normal	Cura incompleta	Dano na fita de proteção	Contaminante interno	Baixa tração durante enfitamento
	Nº das amostras				
	4	5	12	14	18
2	7,90E-09	9,94E-09	8,65E-09	9,98E-09	8,35E-09
3	1,07E-08	1,33E-08	1,12E-08	1,28E-08	1,10E-08

Tensão de ensaio (kV _{CC})	Corrente no dielétrico (A)				
	Amostras				
	Processo normal	Cura incompleta	Dano na fita de proteção	Contaminante interno	Baixa tração durante enfitamento
	Nº das amostras				
	4	5	12	14	18
4	1,22E-08	1,53E-08	1,30E-08	1,43E-08	1,22E-08
5	1,28E-08	1,67E-08	1,41E-08	1,54E-08	1,29E-08
6	1,38E-08	1,79E-08	1,54E-08	1,64E-08	1,40E-08
7	1,46E-08	1,91E-08	1,58E-08	1,74E-08	1,49E-08
8	1,53E-08	2,03E-08	1,66E-08	1,83E-08	1,55E-08
9	1,58E-08	2,18E-08	1,72E-08	1,93E-08	1,60E-08
10	1,61E-08	2,39E-08	1,79E-08	1,99E-08	1,63E-08
11	1,67E-08	2,66E-08	1,87E-08	2,10E-08	1,67E-08
12	1,71E-08	2,83E-08	1,97E-08	2,11E-08	1,71E-08
13	1,76E-08	3,06E-08	2,05E-08	2,10E-08	1,77E-08
14	1,81E-08	3,30E-08	2,13E-08	2,17E-08	1,83E-08
15	1,84E-08	3,45E-08	2,25E-08	2,25E-08	1,89E-08

Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2015)

Na Figura 129 tem-se o gráfico do resultado do ensaio das amostras.

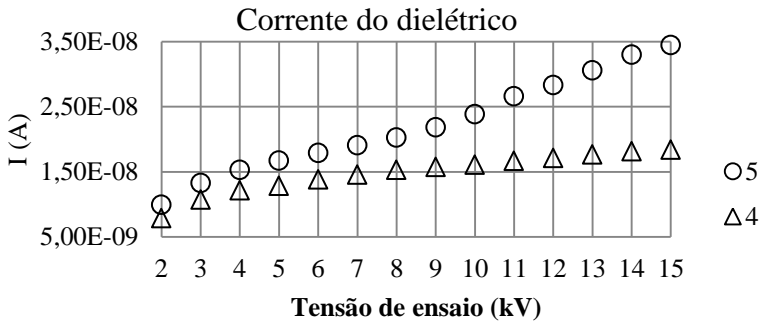
Figura 129 – Resposta à rampa de tensão em tensão contínua



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A amostra número 5 com cura incompleta apresenta perda de linearidade durante o ensaio sob rampa em tensão contínua após 8kV, conforme Figura 130. Pelo mesmo motivo mencionado no ensaio com tensão fixa, a cura incompleta do processo de impregnação da resina epóxi afeta consideravelmente a corrente do dielétrico após 8kVcc.

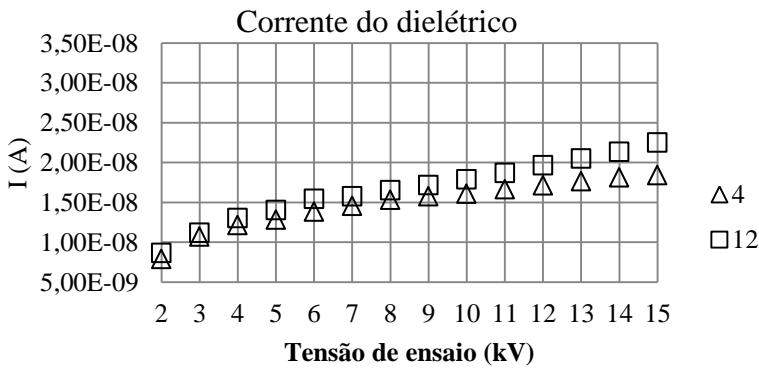
Figura 130 – Comparação entre amostras 4 e 5 para o ensaio de rampa em tensão contínua



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A amostra número 12 com dano na proteção contra descargas parciais não apresenta variação visual considerável que represente a falta simulada.

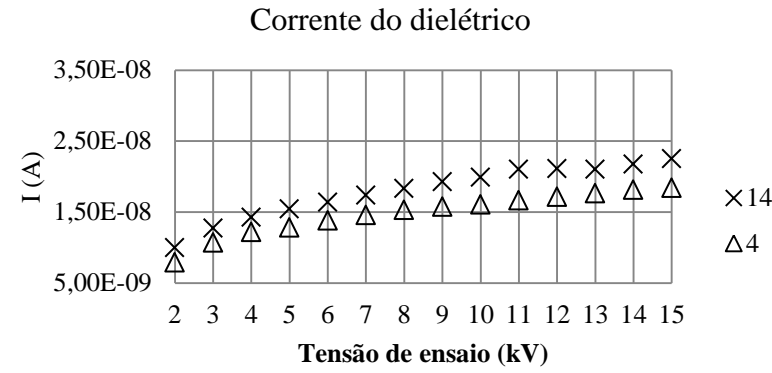
Figura 131 – Comparação entre amostras 4 e 12 para o ensaio de rampa em tensão contínua



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A amostra número 14 , conforme Figura 132, que está contaminada não apresenta perda de linearidade considerável da curva de corrente.

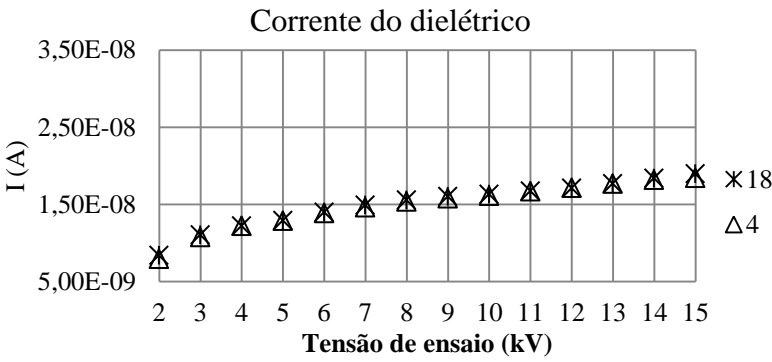
Figura 132 – Comparação entre amostras 4 e 14 para o ensaio de rampa em tensão contínua



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A amostra número 18, conforme Figura 133, com baixa tração de enfitamento, utilizada para simular vazios não apresentou variação considerável durante a medição da corrente do dielétrico sob rampa controlada em tensão contínua.

Figura 133 – Comparação entre amostras 4 e 18 para o ensaio de rampa em tensão contínua



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

4.5 – Considerações finais do capítulo

Este capítulo apresentou o método de ensaio para avaliação dos fenômenos dielétricos através da aplicação de campo elétrico contínuo, com intensidade variável ao longo do tempo de ensaio, tensão CC fixa e ensaios em corrente alternada.

Os resultados dos ensaios de todas as amostras fabricadas e principalmente a justificativa para a eliminação de amostras para a realização do estudo também foram apresentados. Os dados de ensaio e os gráficos apresentados demonstraram que apesar dos esforços de fabricação de amostras fieis ao propósito de cada lote, pequenas variações do processo de fabricação podem afetar o objetivo do trabalho que era apresentar a relação dos fenômenos físicos com os experimentos práticos.

A Tabela 16 mostra os resultados dos ensaios dielétricos das amostras avaliadas. Para o ensaio de resistência da isolação utilizam-se três critérios para a avaliação do dielétrico: a 1 minuto, a 10 minutos e o índice de polarização.

Tabela 16 – Resultados dos ensaios nas amostras

Ensaio	Amostras				
	Processo normal	Cura incompleta	Dano na fita de proteção	Contaminante interno	Baixa tração durante enfiamento
	Nº das amostras				
	4	5	12	14	18
Resistência da Isolação 1 minuto (Ω)	1,5E+12	5,9E+11	1,4E+12	1,7E+11	1,4E+12
Resistência da Isolação 10 minutos (Ω)	6,0 E+12	1,4E+12	4,6E+12	1,7E+11	3,3E+12

Ensaio	Amostras				
	Processo normal	Cura incompleta	Dano na fita de proteção	Contaminante interno	Baixa tração durante enfitamento
	Nº das amostras				
	4	5	12	14	18
Índice de polarização	4,14	2,4	3,17	1,03	2,38
Tan δ sob 2,56kV _{CA} (%)	0,92	1,03	1,07	1,08	1,18
Tip-Up (%)	0,05	0,04	0,13	0,09	0,13
Δ Tan δ (%)	0,05	0,05	0,14	0,12	0,17
Valor médio da Capacitância (nF)	0,58	0,67	0,62	0,50	0,56
Descargas Parciais (pC)	53,19	82,06	312,3	42,95	349,0
Descontinuidade sob rampa em tensão CC (kV)	*	9,0	*	*	*

* *Modo de falha não identificável visualmente*

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Os resultados dos ensaios das amostras aprovadas em cada uma das seções refletem o comportamento dos fenômenos de polarização, condução e descargas parciais, apresentados nos capítulos anteriores. Cada ensaio tem a sua particularidade e principalmente demonstra que o entendimento do comportamento do dielétrico está sujeito a capacidade de realização do correto diagnóstico por parte do avaliador. Os ensaios nos dielétricos de maneira geral contribuem entre si na investigação das

falhas seja confirmando a atividade de um determinado fenômeno ou excluindo-o por completo.

O ensaio de perdas dielétricas é apresentado com três critérios: no primeiro degrau de tensão de ensaio, o Tip-Up e o $\Delta \text{Tan}\delta$. Apresenta-se o valor das descargas parciais para cada amostra e o nível de tensão o qual detecta-se a descontinuidade na corrente do ensaio em tensão contínua. O resultado da capacitância é um valor médio com o objetivo de demonstrar a característica do dielétrico e excluindo os comentários sobre o comportamento da capacitância quando está sob efeito das descargas parciais.

5 - CONCLUSÃO

Dentro dos objetivos deste trabalho, estudaram-se alguns dos principais problemas que podem ocorrer na fabricação de uma isolação de alta tensão (tensões até 13,8kV). Procurou-se fundamentar teoricamente, de maneira resumida, fenômenos que estão diretamente relacionados à qualidade e à confiabilidade de um sistema de isolação. O objetivo principal foi o desenvolvimento de ensaios para avaliar e, se possível, demonstrar a efetividade de cada método/tipo de ensaio na avaliação e/ou determinação de características de um sistema de isolação. Sob este aspecto, procurou-se gerar subsídios e desenvolver massa crítica para ajudar na identificação de prováveis causas de falhas de isolação em uma máquina elétrica. Para tanto, planejou-se o desenvolvimento dos experimentos através de ensaios em cinco tipos de amostras, que foram confeccionadas procurando-se atender um tipo específico de causa para falha. Assim, caracterizaram-se modos de falha e respostas dos dielétricos da isolação empregada quando as amostras foram submetidas ao campo elétrico.

Para cada tipo de falha inserida propositalmente, construiu-se quatro amostras. Houve dificuldades no controle das variáveis na fabricação durante os processos de inserção de falhas, o que provocou o descarte de três das quatro amostras. As amostras com cura incompleta e com contaminante obrigatoriamente deveriam apresentar maior condutividade do que as amostras que não possuem esse tipo de falta. De outra maneira, amostras com cavidades internas ou superficiais deveriam apresentar maior magnitude de descargas parciais que as demais amostras e menor condutividade, pois não possuem falta por condução. Muitas vezes, durante o processo de fabricação, mais de um defeito foi incluído. No Apêndice A foram apresentados todos os resultados encontrados no conjunto total de vinte amostras. Fatores que implicaram no descarte das amostras também são apresentados. Este fato de haver poucas amostras para um mesmo tipo de falha constituiu-se em um problema. Porém, chegou-se a resultados esperados com as amostras escolhidas em relação às normas e aos trabalhos semelhantes estudados na literatura.

Um dos principais objetivos atingidos neste trabalho foi a avaliação dos diferentes ensaios realizados e o desenvolvimento de interpretação do diagnóstico em cada resultado obtido.

Na Tabela 17 cada ensaio realizado recebeu uma identificação “✓” para falta detectada e “✕” para falta não detectada. Na coluna “Processo normal” todos os ensaios receberam a identificação “✓” demonstrando

que para todos os ensaios realizados as amostras apresentaram o resultado esperado, ou seja, o ensaio detectou que a amostra não possuía falta de isolamento simulada. Para as demais amostras cada ensaio foi identificado como possível ou não se identificação da falta de isolamento que foi simulada.

Tabela 17 – Efetividade na detecção da falta de isolamento

Ensaio	Amostras				
	Processo normal	Cura incompleta	Dano na fita de proteção	Contaminante interno	Baixa tração durante enfitamento
	Número das amostras				
	4	5	12	14	18
Resistência da isolamento – 1 minuto	✓	✓	×	✓	×
Resistência da isolamento – 10 minutos	✓	×	×	×	×
Curva de polarização	✓	✓	×	✓	✓
Índice de polarização	✓	×	×	✓	×
Tan δ - 2,56kV _{CA}	✓	×	×	×	×
Tip Up	✓	×	✓	×	✓
Δ Tan δ	✓	×	✓	×	✓
Capacitância	✓	✓	×	✓	✓
(ϵ')/f	✓	×	×	×	✓
(ϵ'')/f	✓	×	×	×	✓
Descargas parciais	✓	×	✓	×	✓
Ensaio em rampa em tensão contínua	✓	✓	×	×	×

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A seguir, faz-se um breve comentário sobre os resultados obtidos e os ensaios associados.

a) Ensaio em rampa de tensão contínua

O ensaio em rampa de tensão contínua, controlando a taxa de crescimento em 1 kV/min, apresentou resultado expressivo (possibilitou uma tomada de decisão) apenas para a amostra número 5 com cura incompleta. Quando se chegou a um nível de tensão que ativou os mecanismos de condutividade (praticamente a partir de 9 kV), a corrente medida apresentou um crescimento além do padrão. Apesar de haver um leve incremento nas correntes nas outras amostras, considera-se que o mecanismo de falhas não foi ativado neste tipo de ensaio. Uma hipótese para esse comportamento das amostras restantes, que não apresentaram variação expressiva na curva de corrente, provavelmente se deve ao nível de tensão possível do ensaio. A rampa foi programada até 15 kVcc em função da limitação do equipamento. Os mecanismos de perdas, como vazios e contaminação, poderiam ser mais representativos provavelmente em ensaios com tensões mais elevadas.

b) Ensaio de resistência da isolamento e índice de polarização

O ensaio de resistência da isolamento e índice de polarização com tensão contínua fixa em 15 kV foi realizado com período fixo de 10 minutos. Esse ensaio deveria ter sido realizado entre 5 a 10 kV para respeitar as recomendações da norma IEEE 43, mas o nível de tensão utilizado foi de 15 kV. O objetivo não foi apenas aplicar a norma, mas investigar e evidenciar os mecanismos de falhas. Assim, o nível foi mais elevado do que recomenda a norma IEEE 43.

As respostas do dielétrico para cada amostra demonstraram um resultado expressivo na detecção das falhas, principalmente para as amostras 18 (que possui cavidades internas), 5 (com cura incompleta) e 14 (que está contaminada). Para estas amostras, elas não apresentaram uma curva típica de resistência da isolamento proporcionada pelos mecanismos de polarização. As curvas tiveram um comportamento de serem praticamente paralelas ao eixo das coordenadas. Isto se deve à corrente de fuga ser elevada em relação à da amostra padrão. Se os mecanismos de polarização fossem preponderantes, a curva teria um comportamento exponencial ao longo do tempo do ensaio. Em outras palavras, a amostra contaminada e a com cura incompleta possuem

comportamentos semelhantes, mas com intensidades de corrente diferentes (maior do que 100% de diferença). O fato dessas duas amostras não apresentarem uma curva de resposta de polarização ao longo dos 10 minutos de ensaios demonstra que a corrente do dielétrico, com cura incompleta, possui o fenômeno de condução mais significativo do que para as demais amostras.

A amostra 18 (com cavidades internas) apresenta um comportamento com predomínio do fenômeno de polarização nos primeiros três minutos de ensaio. Após este instante, há um aumento da intensidade da corrente (diminuição abrupta do valor da resistência de isolamento). Logo em seguida, volta a apresentar comportamento com uma curva de polarização até oito minutos de ensaio. Após este instante, sofre nova queda no valor da resistência da isolamento pelo aumento da intensidade da corrente. Uma das hipóteses para esse comportamento é o fato do aumento da superfície interna criado pelas cavidades. O fluxo de elétrons no interior da isolamento tende a se concentrar na superfície das bolhas internas até que ocorra a saturação da superfície do vazio, liberando elétrons em direção ao eletrodo de medição. Na Figura 51, pode-se notar que a curva para a amostra 12 (possui dano na proteção de descargas parciais) tem um comportamento semelhante ao da amostra 18 (com cavidades internas), porém com menor intensidade.

c) Ensaio de perdas dielétricas – Tangente delta

Uma das principais características provenientes da determinação das perdas dielétricas para avaliar a condição da isolamento através da tangente do ângulo delta é a capacidade do ensaio em ser sensível aos mecanismos de polarização, de condução e de descargas parciais. Porém, é difícil de estimar a contribuição exata de cada um dos mecanismos principalmente a polarização devido à sua constante de relaxação durante o ensaio com um campo elétrico alternado sob uma frequência de 60Hz. Constatou-se que o ensaio de tangente de delta evidencia os defeitos nas amostras 18 (que apresenta cavidades internas) e 12 (com dano na proteção superficial da bobina). Elas apresentam perdas elevadas devido à atividade de descargas parciais. Este fato só pode ser comprovado pelo valor de Tip-Up e $\Delta \tan \delta$ durante a avaliação das perdas dielétricas. A amostra 14 (que está contaminada) apresenta valores de perdas dielétricas maiores que a amostra 4 (amostra padrão, sem defeito) em função da condução provocada pelo material condutivo inserido durante a etapa de fabricação.

A amostra 5 (com cura incompleta) não possui magnitude elevada de descargas parciais por cavidades internas e teve comportamento pouco significativo para as perdas dielétricas. Seu comportamento foi semelhante à resposta da amostra padrão.

d) Ensaio de capacitância

As amostras 18 e 12 (que possuem cavidades internas e externas, respectivamente) apresentam queda no valor da capacitância quando submetidas a um nível de tensão de ensaio capaz de iniciar a atividade de descargas parciais. O valor inicial da capacitância para essas duas amostras é maior que o da amostra padrão. Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento da superfície devido à quantidade e tamanho dos vazios. A amostra 14 (com material contaminante condutivo) apresentou um valor de capacitância menor do que o da amostra 4 padrão. Provavelmente, isto se deve ao material condutivo inserido que torna a permissividade do meio menor, de maneira a apresentar uma capacitância menor. A amostra 5 apresentou valor de capacitância maior que a referência, pois, conforme STONE (2004), a permissividade elétrica relativa da resina quando líquida é maior do que quando a cura está completa.

e) Ensaio de perdas dielétricas com variação da frequência da tensão

As medições da permissividade, do fator de perdas e das perdas dielétricas ($\tan\delta$) do dielétrico no ensaio de frequência variável apresentaram resultados promissores para avaliar o sistema de isolamento. Apesar do nível de tensão nos ensaios realizados ser em 200V (aparentemente é um valor baixo para uma avaliação de um sistema de isolamento para 13,8kV), os resultados detectaram a falha de cavidade interna (amostra 18), o que não foi evidenciado nos outros ensaios. Porém, isto foi evidente para frequências menores que 10 mHz. Nestas frequências baixas, a polarização por cargas espaciais é evidenciada principalmente no valor da permissividade relativa (vide Figura 56). Uma isolamento sem cavidades possui baixa polarização interfacial, e o comportamento do valor da permissividade relativa para as demais amostras é pouco alterado se comparado com a amostra com cavidades internas.

O comportamento da amostra 18 (com cavidades internas) durante a medição das perdas dielétricas apresenta comportamento coerente com a curva de dispersão do dielétrico.

f) Ensaio de descargas parciais

A determinação da magnitude das descargas parciais é uma importante ferramenta para a determinação da evolução do mecanismo de deterioração da resina utilizada no sistema de impregnação. As amostras fabricadas para simulação de cavidades internas (amostra 18) e na superfície (amostra 12) apresentam a magnitude de descargas parciais e o padrão conforme esperado. As demais amostras não apresentaram magnitude elevada de descargas parciais e também apresentaram o padrão esperado.

g) Considerações finais

Abordaram-se alguns dielétricos aplicados em sistemas de isolamento para alta tensão em máquinas girantes. Procurou-se entender os resultados de ensaios de amostras com a inserção de defeitos. Espera-se que este estudo possa contribuir para a compreensão dos fenômenos envolvidos durante o desenvolvimento e implementação do sistema de isolamento, bem como aqueles que diminuem a vida útil da isolamento de um estator de uma máquina elétrica girante. Houve dificuldades detectadas durante a fabricação e a validação das amostras, apresentando um grau de dificuldade do domínio do processo de fabricação e, principalmente, do domínio sobre como efetuar as medidas elétricas e de interpretar os resultados.

Como sugestão de trabalhos futuros, sugere-se a melhoria da fabricação de amostras, que sejam também submetidas a ensaios de envelhecimento, que se façam medições e análises antes, durante e depois do envelhecimento. Outra sugestão de trabalhos futuros é a realização do ensaio com rampa de tensão contínua com tensão final em torno de 40 kV (algumas amostras foram levadas até 45 kV e tiveram rompimento do dielétrico).

Do ponto de vista de modelos matemáticos, sugere-se aplicar o método de elementos finitos na geometria da amostra para calcular os parâmetros elétricos do circuito equivalente proposto na literatura. Os resultados obtidos com o circuito equivalente podem ser comparados com os resultados experimentais.

REFERÊNCIAS

AZUAJE, C.J.; TORRES, W.J. Experiences in identification of partial discharge pattern in large hydrogenerators. **Transmission & distribution conference and exposition: Latin america, 2006. TDC '06. IEEE/PES**, Caracas, p. 1-6, Ago., 2006

BASTOS, João Pedro Assumpção. **Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática**. Florianópolis: Ed. UFSC. 2008.

DA SILVA, Guilherme. **Descargas parciais estimuladas por raios-X contínuo e pulsado em materiais eielétricos: similaridades e diferenças**, 2005. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia - PIPE, área de Engenharia e Ciência dos Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005

EVERSHED, Sydney. **The characteristics of insulation resistance**. Journal of the institution of electrical engineers, p.51-73, dez., 1913.

GOMES, Daisy. **Estudo dos mecanismos de relaxação dielétrica e mecânica na borracha natural**, 2008. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia - PIPE, área de Engenharia e Ciência dos Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

HAQ, Saeed Ul. **A study on insulation problems in drive fed medium voltage induction motors**, 2007. Tese (Doutorado) - Electrical and Computer Engineering, University of Waterloo. Waterloo, 2007.

HILL, Leslie. **Testing electrical insulation of rotating machinery with high-voltage direct current**. Aiee transactions power apparatus and system, v.3, p.159-174, 1953.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 95: recommended practice for insulation testing of large AC rotating machinery with high direct voltage**. New York ,1977. Disponível em: < <https://standards.ieee.org/findstds/standard/95-1977.html>>. Acesso em: 15 Jun. 2014. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS.

IEEE 95: recommended practice for insulation testing of AC electric machinery (2300 V and above) with high direct voltage. New York, 2002. Disponível em: < <https://standards.ieee.org/findstds/standard/95-2002.html>>. Acesso em: 15 Jun. 2014. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS.

IEEE 286: practice for measurement of power factor tip-up of electric machinery stator coil insulation coil insulation, New York, 2000. Disponível em: < <http://standards.ieee.org/findstds/standard/286-2000.html>>. Acesso em: 15 Jun. 2014. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS.

IEEE 43: recommended practice for testing insulation resistance of rotating machinery, New York, 2000. Disponível em: < <http://standards.ieee.org/findstds/standard/43-2000.html>>. Acesso em: 15 Jun. 2014. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS.

IEEE 1434: guide for the measurement of partial discharges in AC electric machinery, New York, 2000. Disponível em: < <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1434-2000.html>>. Acesso em: 15 Jun. 2014. Acesso exclusivo para assinantes da coleção eletrônica.

JHONSON, J; ZWIENER, A. **D-C testing experience on rotating machine insulation.** Aiee transactions power apparatus and system, v.3, p.416-420, 1957.

KALKNET, W. et al. Synchronous 3-phase partial discharge detection on rotating machines. **XIVth international symposium on high voltage engineering**, Beijing, g-042, ago., 2005.

KUFFEL, E; ZAENGL W.S.; KUFFEL J. **High voltage engineering.** Oxford: Ed. Butterworth-Heinemann, 2000.

NAIDU, M; KAMARAJU, V. **High voltage engineering**, ed. McGraw-Hill, p. 81-96. 1996.

NICOLAU, Aline. **Propriedades dielétricas de sistema epóxi-anidrido com diferentes composições**, 2005. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Química, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

NUCCI, Ana. **Estudo de propriedades dielétricas de sistema epóxi-anidrido**, 2005. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Química, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

MACEDO, Annita. **Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara, 1988.

MORA, Nora Diaz. **Apostila de Materiais Elétricos**. Foz do Iguaçu: Universidade Estadual Do Oeste Do Paraná. Laboratório de Materiais. Disponível em: <<http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap18.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2014.

RUX, Lorelynn Mary, **The physical phenomena associated with stator winding insulation condition as detected by the ramped direct high-voltage method**, 2004. Tese (Doutorado) - Department of Electrical and Computer Engineering, Mississippi State University, Mississippi, 2004.

RAJU, Gorur C. **Dielectrics in Electric Field**. Ontario: Ed. Marcel Dekker, Inc, 2003.

RUX, Lorelynn Mary; GRZYBOWSKI S. Evaluation of delaminated high-voltage rotating machine stator winding groundwall insulation. **IEEE international symposium**, Anaheim, p. 520-523, Abr., 2000.

SCHLEIF, F. **Corrections for dielectric absorption in high voltage D-C insulation tests**. Aieee transactions power apparatus and system, v.3, p.263-269, 1956.

STONE, Greg et al. **Electrical insulation for rotation machines. design, evaluation, aging, testing, and repair**, New Jersey: ed. IEEE, p.15, 2004.

STONE, Greg et al. **Electrical insulation for rotation machines. design, evaluation, aging, testing, and repair**, New Jersey: ed. IEEE, p.91, 2004.

STONE, Greg et al. The ability of diagnostics test to estimate the remaining life of stator insulation. **Ieee transactions on energy conversion**, v. 3, n. 4, p.833-841 dez., 1988.

TAYLOR, Nathaniel. **Dielectric response and partial discharge measurements on stator insulation at varied low frequency**, 2006. Tese (Doutorado) - KTH - School of Electrical Engineering. Stockholm 2006.

VOGELSANG, Ruben; FRUTH, Bernhard; DUCRY, Oliver. Performance testing of high voltage generator- and motor insulation systems. **5th WSEAS/IASME int. conf. on electric power systems, high voltages, electric machine**, Tenerife, p. 136-142, dez., 2005.

VON ROLL UNIVERSITY, **Insulation System Training**, Switzerland, 2007

WARREN. V; STONE, Greg; KANTARDZISKI, P. **Partial discharges testing as a predictive maintenance tool for hydraulic generator**, 2007.

APÊNDICE A – DADOS TÉCNICOS DOS MATERIAIS UTILIZADOS E DIMENSÕES DAS AMOSTRAS

A1– Materiais dielétricos

Neste apêndice apresentam-se os materiais utilizados na construção das amostras do sistema de isolamento e as dimensões das amostras.

A1.1 – Materiais utilizados no dielétrico

A1.1.1 – Mica - Isolação principal

A isolamento principal é feita com fita a base de tecido de vidro, com papel de mica muscovita impregnado e com acelerador de cura. É geralmente usada na região da ranhura do núcleo ferromagnético e cabeça de bobina do estator que é submetido ao processo de impregnação por vácuo e pressão (VPI) com resina epóxi-anidrido.

Tabela A1 – Dados da fita de mica

Característica	Unidade	Valor declarado
Porosidade	s/100ml	≤ 800
Espessura	mm	$0,15 \pm 0,02$
Papel de mica	g/m^2	160 ± 10
Quantidade de resina	g/m^2	17 ± 3
Tecido de vidro	g/m^2	23 ± 2
Acelerador	mg/m^2	480 ± 120
Resistência à tração	N/cm	≥ 80
Classe térmica		F

Fonte: Von Roll

A1.1.2 – Fita a base de carbono

É a fita a base de poliéster impregnada com verniz contendo carbono.

Tabela A2 – Dados da fita a base de carbono

Característica	Unidade	Valor declarado
Espessura	mm	$0,12 \pm 0,02$
Peso	g/m^2	110 ± 11

Característica	Unidade	Valor declarado
Resistência à tração	N/m	≤ 40
Resistência superficial	Ω	200 ± 50

Fonte: Isovolta

A1.1.3 – Fita a base de carbetto de silício

A fita a base de carbetto de silício possui uma camada de resina completamente curada sobre uma camada de tecido de poliéster.

Tabela A3 – Dados da fita a base de carbetto de silício

Característica	Unidade	Valor declarado
Espessura	mm	$0,25 \pm 0,03$
Tração	N/cm	≥ 100
Massa por unidade de área	g/m^2	360 ± 30
Ruptura por alongamento	%	≥ 10
Encolhimento após 2h a 160°C	%	≤ 5

Fonte: Von Roll

A1.1.4 – Fita de proteção contra corona

A fita a base de poliéster com uma camada termoretrátil de poliéster combinado com vidro possui naftanato de zinco para acelerar o processo de cura e é compatível com resina epóxi-anidrido.

Tabela A4 – Dados da fita de proteção contra corona

Característica	Unidade	Valor declarado
Espessura	mm	$0,09 \pm 0,01$
Tração	N/10mm	≥ 60
Rigidez dielétrica	kV	≥ 3
Alongamento	%	≥ 20
Encolhimento após 2h a 160°C	%	≥ 8

Fonte: Isovolta

A1.1.5 – Resina epóxi

A resina epóxi para o processo de vácuo e impregnação (VPI) possui a adição de agente de cura anidrido e dois aceleradores.

Tabela A5 – Dados da resina epóxi

Característica	Unidade	Valor declarado
Transição vítrea	°C	135-145
Temperatura de decomposição	°C	≥350
Rigidez dielétrica	kV/mm	23-28

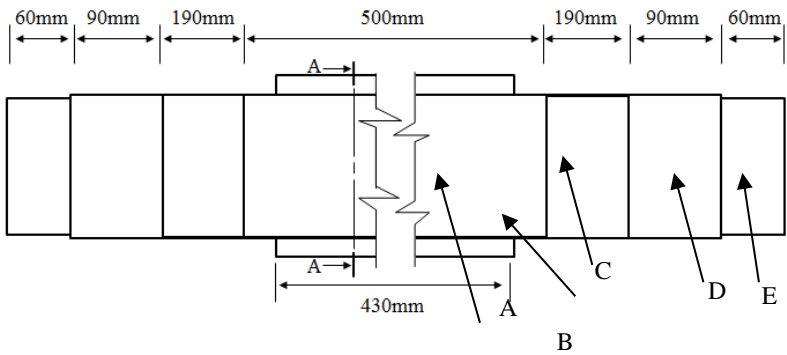
Fonte: Hunstman

A2 – Dimensões e características das amostras

A2.1 – Dimensões das amostras e materiais utilizados

Na Figura A1 é apresentado o comprimento dos materiais das amostras e a posição onde a seção transversal (AA) será usada para demonstrar os detalhes da espessura dos materiais.

Figura A1 – Dimensões das amostras de isolamento



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

Na Tabela A6 é mostrada a identificação de cada material do sistema de isolamento que foi apresentado na Figura A1.

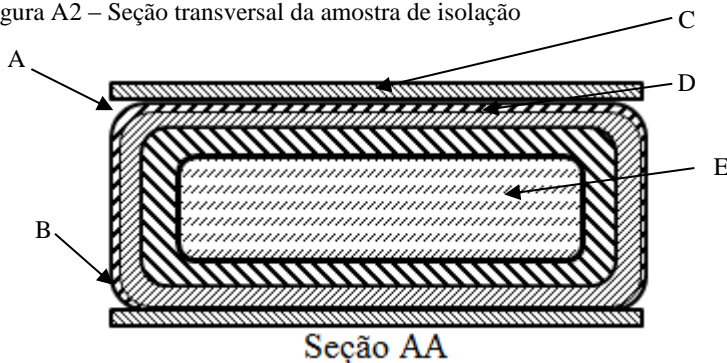
Tabela A6 – Materiais utilizados nas amostras

Identificação	Material
A	Fita a base de carbono
B	Eletrodo - Cobre
C	Fita a base de carbetto de silício
D	Mica
E	Barra de alumínio

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A Figura A2 mostra a seção transversal da amostra na região da ranhura. Para a construção das amostras, as fitas da isolação foram aplicadas respeitando uma sobreposição de 48% entre elas. A camada de mica possui 10 camadas e 3 milímetros de espessura. As camadas de proteção, a base de carbono, carbetto de silício e proteção contra corona possuem 2 camadas cada.

Figura A2 – Seção transversal da amostra de isolação



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A2.1.1 – Amostra padrão

A amostra padrão respeita todas as etapas de fabricação (enfitamento, impregnação, e cura) e visualmente não possui característica a ser mencionada.

A2.1.2 – Amostra com cura incompleta

A amostra com cura incompleta foi retirada da estufa após 18h sob uma temperatura de 120°C. O processo padrão para cura da resina epóxi é de 24h a 170°C. Visualmente não possui característica a ser mencionada.

A2.1.3 – Amostra com dano na fita de proteção contra descargas parciais para simulação de vazios na superfície

A amostra com dano na proteção contra descargas parciais possui todas as características de uma isolamento padrão, mas foi danificada antes do processo de impregnação. O dano foi propositalmente executado para simular descargas superficiais dentro da ranhura do núcleo ferromagnético.

Figura A3 – Dano na proteção contra descargas parciais



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2015)

A2.1.4 – Contaminante interno

A amostra contaminada recebeu a inserção de 30cm de material condutivo, a base de carbono, entre a quinta e sexta camada de mica. Visualmente não é possível apresentar a falha inserida.

A2.1.5 – Baixa tração durante enfitamento para simulação de vazios internos

A amostra para simulação de descargas parciais não recebeu a tração de enfitamento conforme procedimento padrão. Além disso, não foram utilizadas calhas de fibra de vidro para simulação da ranhura, o que permite que a resina do processo de impregnação escorra durante a cura. Visualmente não é possível apresentar a falha inserida.